



⑬ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Übersetzung der  
europäischen Patentschrift**

⑨⑦ **EP 0 664 037 B 1**

⑩ **DE 692 32 314 T 2**

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 06 K 9/00**

- |    |   |                |
|----|---|----------------|
| ②① | Deutsches Aktenzeichen:                               | 692 32 314.7   |
| ②⑥ | PCT-Aktenzeichen:                                     | PCT/US92/08673 |
| ②⑤ | Europäisches Aktenzeichen:                            | 92 921 735.4   |
| ②⑦ | PCT-Veröffentlichungs-Nr.:                            | WO 94/09446    |
| ②⑥ | PCT-Anmeldetag:                                       | 10. 10. 1992   |
| ②⑦ | Veröffentlichungstag<br>der PCT-Anmeldung:            | 28. 4. 1994    |
| ②⑦ | Erstveröffentlichung durch das EPA:                   | 26. 7. 1995    |
| ②⑦ | Veröffentlichungstag<br>der Patenterteilung beim EPA: | 19. 12. 2001   |
| ④⑦ | Veröffentlichungstag im Patentblatt:                  | 20. 6. 2002    |

⑦③ **Patentinhaber:**  
Iridian Technologies, Inc., Moorestown, N.J., US

⑦④ **Vertreter:**  
Dr. Weber, Dipl.-Phys. Seiffert, Dr. Lieke, 65189  
Wiesbaden

⑧④ **Benannte Vertragsstaaten:**  
AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LI, LU, MC,  
NL, SE

⑦② **Erfinder:**  
Daugman, John G., Huntingdon, Cambridgeshire  
PE18 9JX, GB

⑤④ **BIOMETRISCHES PERSONENIDENTIFIZIERUNGSSYSTEM AUF DER BASIS VON IRIS-ANALYSE**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**DE 692 32 314 T 2**

**DE 692 32 314 T 2**

92921735.4 - 0664037  
Iridian Technologies, Inc.

- 5 Diese Erfindung betrifft das Gebiet der Personenidentifikation und mehr im speziellen das Gebiet der automatischen Identifikation von Menschen durch biometrische Indizien.

Die Identifizierung von Menschen ist ein Ziel, das so alt ist wie die Menschheit selbst. Wie sich die Technologie und Dienstleistungen in der modernen Welt entwickelt haben, so haben sich menschliche Aktivitäten und Transaktionen stark vermehrt, in denen eine schnelle und zuverlässige Personenidentifikation notwendig ist. Beispiele beinhalten Paßkontrolle, Computerloginkontrolle, automatische Geldautomaten und andere Autorisierungstransaktionen, Gebäudezugangskontrollen und Sicherheitssysteme im allgemeinen. Alle diese Identifikationsversuche teilen die gemeinsamen Ziele der Geschwindigkeit, der Zuverlässigkeit und der Automaton.

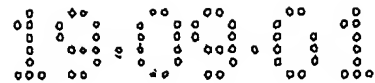
15

Die Verwendung von biometrischen Indizien für Identifizierungszwecke erfordert, daß ein bestimmter biometrischer Faktor einzigartig für jedes Individuum ist, der leicht gemessen werden kann und der über die Zeit unverändert bleibt. Obgleich viele Indizien über die Jahre vorgeschlagen wurden, sind Fingerabdrücke wahrscheinlich das bekannteste Beispiel eines erfolgreichen biometrischen Identifikationsschemas. Wie gut bekannt ist, sind keine zwei Fingerabdrücke gleich und sie verändern sich nicht außer durch Verletzungen oder chirurgische Eingriffe. Es ist ebenso klar, daß die Identifikation durch Fingerabdrücke jedoch unter dem signifikanten Nachteil leidet, daß ein physischer Kontakt mit der Person erforderlich ist. Es existiert kein Verfahren zum Beschaffen eines Fingerabdrucks aus einer Distanz, noch erscheint solch ein Verfahren wahrscheinlich.

25

Ein biometrischer Indikator, der weitgehend von der Technik ignoriert wurde, ist die Iris. Die Iris von jedem menschlichen Auge hat eine einzigartige Textur von hoher Komplexität, die sich als im wesentlichen unveränderlich über die Lebensdauer der Person erwiesen hat. Keine zwei Irissen sind in der Textur oder im Detail identisch, selbst bei derselben Person. Als ein inneres Organ des Auges ist die Iris von der äußeren Umgebung gut geschützt, doch ist sie als farbige Scheibe hinter dem durchsichtigen Schutzfenster der Augenhornhaut umgeben von dem weißen Gewebe des Auges leicht sichtbar selbst von einem yardweiten Abstand. Obwohl sich die Iris ausdehnt und zusammenzieht, um die Größe der Pupille in Antwort auf Lichteinfall einzustellen, bleibt ihre detaillierte Textur weitgehend unverändert, abgesehen von der Ausdehnung und dem Zusammenziehen. Solche Störungen in der Textur können in der Analyse eines Irisabbildes leicht mathematisch umgekehrt werden, um eine Irissignatur zu extrahieren und zu verschlüsseln, die über einen weiten Bereich der Pupillenausdehnung gleich bleibt. Die Ornamentik, Einzigartigkeit und Unveränderlichkeit der Iristextur sowie ihre Sichtbarkeit von außen macht die Iris für eine automatische und hoch zuverlässige Personenidentifikation geeignet. Die Registrierung und Identifikation der Iris kann automa-

30  
35



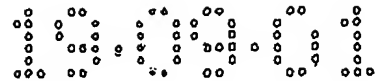
tisch und in nicht aufdringlicher Weise mit Hilfe einer Videokamera ohne irgendeinen physischen Kontakt durchgeführt werden.

Im Vergleich haben alle anderen blometrischen Merkmale, wie z.B. Unterschriften, Fotografien, Fingerabdrücke, Sonogramme und Retinablutgefäßmuster, wesentliche Nachteile. Obgleich Unterschriften und Fotografien billig und leicht zu erhalten und abzulegen sind, sind sie nicht in der Lage, mit Sicherheit automatisch zu identifizieren und werden leicht gefälscht. Elektronisch aufgezeichnete Sonogramme sind auf Veränderungen in der Stimme einer Person anfällig und sie können gefälscht werden. Fingerabdrücke oder Handabdrücke erfordern physischen Kontakt und können ebenso gefälscht und beeinträchtigt werden durch Artefakte.

Die Irisidentifikation darf nicht mit der Retinaidentifikation verwechselt werden. Die Iris ist leicht zu sehen und kann leicht mit einer Videokamera abgebildet werden. Im Gegensatz dazu ist die Retina tief innerhalb des Auges versteckt und schwer zu sehen. Übliche Zustände, wie z.B. kleine Pupillen oder grauer Star machen es schwierig oder unmöglich, die Retina zu sehen, beeinflussen jedoch nicht die Sichtbarkeit der Iris.

Die einzige vorherige Anstrengung, um von den Vorteilen dieser vielversprechenden Charakteristik der Iris für ein Personenidentifikationssystem zu profitieren, ist in der US-Patentschrift Nr. 4,641,349 zu sehen, die auf Flom und Safir ausgegeben wurde und den Titel "Iris Recognition System" trägt (im folgenden mit '349 bezeichnet). Die '349-Referenz zeigt das allgemeine Konzept der Verwendung der Iris als ein Identifizierungsverfahren, sie beschreibt jedoch nicht eine entwickelte Ausführungsform solch eines Systems. Sie zeigt keine automatische Einrichtung, um die Iris innerhalb eines Bildes zu finden und zu isolieren ungeachtet des Ortes und der Größe der Iris, noch Einrichtungen für die Extrahierung und Verschlüsselung ihrer Textur. Die '349-Referenz verwendet die adaptive Beleuchtung, um die Pupille in eine vorherbestimmte Größe zu bringen, um die Probleme der Variation in dem Irismuster mit der Variation der Pupillengröße zu überwinden. Darüber hinaus beschreibt die '349-Referenz kein Verfahren für die Berechnung einer Identifikationsentscheidung, nachdem einmal eine Liste mit Merkmalen zusammengestellt wurde. Im allgemeinen wird eine Liste von Merkmalen von zwei Irisbildern teilweise übereinstimmen und teilweise nicht übereinstimmen, egal ob sie von der gleichen Iris stammen oder nicht. Im allgemeinen werden solche Listen sich ebenso in der Anzahl von Merkmalen, die sie umfassen, unterscheiden. Keine theoretische oder mathematische Formulierung wurde zur Verfügung gestellt für begründete Entscheidungen auf Basis solcher Vergleiche zwischen inkommensurablen Datensätzen. Darüber hinaus wurde kein Verfahren offenbart für die Berechnung des Sicherheitsgrades, der mit den Identifikationen verknüpft ist.

Das Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren und einen Apparat für die Identifizierung von Personen zur Verfügung zu stellen, basierend auf der Iris irgendeines Auges, das die obigen Probleme der Pupillengröße auf einem anderen Weg überwindet.



Ein weiteres Ziel der Erfindung ist es, eine extrem zuverlässige und schnelle Identifikation einer Person in etwa einer Sekunde zu erlauben.

- 5        Noch ein weiteres Ziel der Erfindung ist es, ein Identifikationssystem zur Verfügung zu stellen, das ohne eine Aktion von dem Subjekt und ohne daß ein physischer Kontakt mit dem Subjekt hergestellt wird, die Identifizierung zur Verfügung stellt.

- Diese und andere Ziele werden in der vorliegenden Erfindung durch ein Verfahren und einen
- 10    Apparat für die einzigartige Identifizierung eines speziellen Menschen erreicht, wie in den Ansprüchen 1 und 24 definiert. Die folgenden Schritte werden im Detail ausgeführt: Zunächst beschafft sich das System über eine Videokamera ein digitalisiertes Bild eines Auges der zu identifizierenden menschlichen Person. Dann isoliert es die Iris, sofern sie innerhalb des Bildes präsent ist, und definiert eine kreisförmige Pupillengrenze zwischen der Iris und Pupillenabschnitten des Bildes und es
- 15    definiert eine andere kreisförmige Grenze zwischen der Iris und Lederhautabschnitten (Sclera) des Bildes unter Verwendung von Bögen, die nicht notwendigerweise konzentrisch zu der Pupillengrenze liegen. Das System der Erfindung stellt ein System von Polarkoordinaten auf dem isolierten Irisbild zur Verfügung, wobei der Ursprung des Koordinatensystems das Zentrum der kreisförmigen Pupillengrenze ist. Es definiert dann eine Mehrzahl von ringförmigen Analysebändern innerhalb des
- 20    Irisabbildes, wobei diese Analysebänder bestimmte vorgewählte Abschnitte des Irisbildes ausschließen, die wahrscheinlich durch die Augenlider, die Wimpern oder spiegelnde Reflexion von einer Beleuchtung verdeckt bzw. unsichtbar gemacht werden.

- Der Teil des Irisabbildes, der innerhalb dieser ringförmigen Analysebänder liegt, wird analysiert und verschlüsselt unter Einsatz einer speziellen Signalverarbeitungseinrichtung, die mehrskalige, selbstähnliche, zweidimensionale Bandpaßfilter mit Phasenverschiebung in Polarkoordinaten aufweist, um einen Iriscode einer festen Länge und mit einem universellen Format für alle Irisse zu erzeugen. Der resultierende Code wird als ein Referenzcode abgelegt. Aufgrund des universellen Formates und der Länge aller dieser Iriscodes werden die Vergleiche zwischen unterschiedlichen
- 25    Iriscodes extrem effizient und einfach. Ausdrücklich gesagt wird ein Vergleich zwischen irgendwelchen zwei Iriscodes durch Berechnen des elementaren logischen XOR (logische Exklusiv-Oder-Funktion) zwischen all ihren entsprechenden Bits und dann durch Berechnen der Norm des resultierenden binären Vektors erreicht. Diese Vergleichsmessung kann ebenso als der Hamming-Abstand zwischen den zwei Iriscodevektoren beschrieben werden. Das universelle Format der Iriscodes bleibt sich selbst für die schnelle parallele Suche über große Datenbanken von gespeicherten Referenziris
- 30    codes an, um die Identität eines Individuums zu bestimmen.
- 35    codes an, um die Identität eines Individuums zu bestimmen.

Um eine Identifikation unter Verwendung des Referenzcodes durchzuführen, erzeugt das System von einem Identifikationssubjekt einen Identifikationscode entsprechend dem Schritt des

Zurverfügungstellens, des Definierens, des Bestimmens, des Erstellens, des Beschreibens und des Analysierens. Das System vergleicht dann den Identifikationscode mit dem Referenzcode, um den Hamming-Abstand zwischen den Codes zu ermitteln. Dieser Abstand wird dann in eine berechnete Wahrscheinlichkeit umgewandelt, daß die zwei Codes von derselben Iris stammen und somit von derselben Person durch Berechnen der Wahrscheinlichkeit, daß der beobachtete Übereinstimmungsanteil von Bits in den zwei Codes durch Zufall übereinstimmen könnte, wenn die zwei Codes unabhängig wären. Ein vorbestimmtes Kriterium, das auf diesen gemessenen Hamming-Abstand angewendet wird, erzeugt eine "Ja"- oder "Nein"-Entscheidung und der Sicherheitsgrad der Entscheidung wird durch die berechnete Wahrscheinlichkeit zur Verfügung gestellt.

Auf diese, zusammen mit anderen Zielen der Erfindung wird zusammen mit verschiedenen Neuheitsmerkmalen, die die Erfindung charakterisieren, mit Ausführlichkeit in den hier angeführten Ansprüchen hingewiesen, die Teil dieser Offenbarung bilden. Für ein besseres Verständnis der Erfindung, ihrer Funktionsvorteile und der speziellen Ziele, die durch ihre Verwendung erreicht werden, wird auf die begleitenden Zeichnungen und die Beschreibung Bezug genommen, in der eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung dargestellt ist.

Figur 1 ist ein Blockdiagramm, das die wichtigsten Schritte des Verfahrens der vorliegenden Erfindung darstellt.

Figur 2 ist eine Fotografie eines menschlichen Auges, das bedeckt ist, um das Verfahren der vorliegenden Erfindung zu demonstrieren.

Figur 3 illustriert die Bandpaßfilter mit Phasenverschiebung, die von der vorliegenden Erfindung als Bildfaltungskerne verwendet werden, um die Irisstruktur mit vielen Analysenskallierungen zu extrahieren.

Die Figuren 4A-4C sind ein Satz von Drucken, die darstellen, wie die Irisbilddaten durch die Bandpaßfilter mit Phasenverschiebung entsprechend der vorliegenden Erfindung in Iriscodebits umgewandelt werden.

Figur 5 ist eine Darstellung, die den Hamming-Abstand für "Betrüger" zeigt, das heißt für Vergleiche zwischen Iriscodes, die von unterschiedlichen Irissen berechnet wurden.

Figur 6 ist ein Ausdruck, der den Ansatz für die statistische Entscheidungstheorie zeigt.

Figur 7 ist ein Ausdruck, der die theoretischen Effekte der Manipulierung des Entscheidungskriteriums darstellt.

Figur 8 ist ein Ausdruck, der den Hamming-Abstand für "Berechtigte" zeigt, das heißt für Vergleiche zwischen Iriscodes, die bei unterschiedlichen Gelegenheiten von der gleichen Iris berechnet wurden.

5      Figur 9 ist ein kombinierter Ausdruck, der Hamming-Abstände für "Berechtigte" und "Betrüger" zeigt.

Figur 10 ist ein Ausdruck, der einen binomischen Fit an die Verteilung der Hamming-Abstände zeigt.

10

Figur 11 ist ein Ausdruck des Fehlers als Funktion des Hamming-Abstandskriteriums und

Figur 12 ist eine Tabelle mit Leistungsgraden, die mit der vorliegenden Erfindung erzielt wurden.

15

Eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist in schematischer Form in Figur 1 gezeigt und umfaßt ein Blockdiagramm, das die wichtigsten Schritte in der Entwicklung eines Irisidentifikationscodes für eine Person und die darauffolgende Verwendung dieses Codes für die Durchführung einer Identifikation darstellt. Das Verfahren wird in allgemeinen Begriffen erörtert, gefolgt von einer detaillierten Analyse.

20

Die Iris des menschlichen Auges ist eine komplexe Struktur, die einen Muskel, ein trabekuläres Maschenwerk eines Pektinbandes, Bindegewebe, Blutgefäße und Chromatophoren aufweist. Nach außen stellt sie eine sichtbare Textur mit einer Variation sowohl in radialer als auch in Umfangsrichtung dar, die von Kontraktionsfurchen, kollagenen Stromfasern, Filamenten, gewundenen Gefäßen, Ringen, Krypten und Sprossen herrühren, die zusammengenommen einen unverwechselbaren "Fingerabdruck" bilden. Das vergrößerte optische Abbild einer menschlichen Iris bildet somit eine glaubwürdige biometrische Signatur für das Errichten oder das Bestätigen einer Personenidentität. Weitere Eigenschaften der Iris, die diese für diesen Zweck selbst zur Verfügung stellt und diese potentiell Fingerabdrücke für automatische Identifikationssysteme überlegen macht, beinhalten die Unmöglichkeit der chirurgischen Modifizierung ihrer Textur ohne ein nicht akzeptables Risiko, ihren inhärenten Schutz und ihre Isolation von der physikalischen Umgebung, da es ein Inneres Organ des Auges hinter der Bindehaut und Kammerwasser ist, und ihre leicht zu überwachende physiologische Antwort auf Licht, die einen natürlichen Test gegen Artefakte zur Verfügung stellt.

30

Zusätzliche technische Vorteile gegenüber Fingerabdrücken für ein automatisches Erkennungssystem beinhalten die einfache Registrierung der Iris auf optischem Wege ohne physischen Kontakt und die Intrinsische Polargeometrie der Iris, die ein natürliches Koordinatensystem und einen Ursprung vermittelt.

35

Unbekannt war bis zu der Forschung, die zu der vorliegenden Erfindung führt, ob es einen ausreichenden Freiheitsgrad gibt oder ausreichend Variation in der Iris über die einzelnen Individuen, so daß sie die gleiche Einzigartigkeit abgibt wie ein konventioneller Fingerabdruck. Ebenso un-

5 bestimmt war, ob effiziente Algorithmen entwickelt werden können, um die detaillierte Irisstruktur zuverlässig von einem Videoabbild zu extrahieren, einen kompakten Code (von winziger Länge verglichen mit der Bilddatengröße) zu erzeugen und eine Entscheidung über die Identität mit hoher statistischer Sicherheit durchzuführen, alles dies innerhalb von weniger als einer Sekunde der Verarbeitungszeit von konventionellen Geräten. Die vorliegende Erfindung löst alle diese Fragen beja-

10 hend.

Auf dem allgemeinsten Niveau kann man sich das System der vorliegenden Erfindung in fünf Schritten vorstellen. Als erstes muß ein Abbild des zu analysierenden Auges in digitaler Form, das für die Analyse geeignet ist, beschafft werden, wie in Block 10 von Figur 1 gezeigt. Dann muß der

15 Irisabschnitt des Bildes definiert und isoliert werden (Blöcke 12, 14, 16 und 18). Der definierte Bereich des Bildes muß als nächstes analysiert werden, um einen Iriscode zu erzeugen (Block 20). Es sollte erwähnt werden, daß der erste Iriscode, der für eine bestimmte Iris erzeugt wird, als ein Referenzcode abgelegt wird (Block 22). Bei folgenden Begegnungen verwendet das System den Referenzcode, um eine Identifikation durchzuführen durch Vergleich eines gezeigten Codes (Block 24)

20 mit dem Referenzcode, um einen Hamming-Abstand (Block 26) zu erhalten. Diese Daten erlauben dem System, die Identität des Subjekts zu etablieren, zu bestätigen oder nicht zu bestätigen (Block 28) und einen Sicherheitsgrad für die Entscheidung zu berechnen (Block 30). Die Schnelligkeit des Verfahrens ermöglicht ebenso die passive Identifikation durch umfassende Suche durch eine große Datenbank anstelle lediglich der Überprüfung eines einzelnen Autorisierungscode.

25 In einer praktischen Anwendung dieses Systems zeigt ein digitalisiertes Bild, wie es in Figur 2 dargestellt ist, ein Auge 100 mit einer Iris 102, die eine Pupille 104 umgibt. Der Lederhautabschnitt des Auges 105, der der weiße Abschnitt ist, umgibt die Iris 102. Der erste Schritt in der Verarbeitung des Bildes ist die Lokalisierung der Pupillengrenze 106, die Separierung der Pupille 104 von der Iris

30 102 mit einem hohen Genauigkeitsgrad (Block 12, Figur 1). Dieser Schritt ist entscheidend, um sicherzustellen, daß identische Abschnitte der Iris zu jeder Zeit, wenn ein Bild analysiert wird, ungeachtet des Grades der Pupillenausdehnung identischen Koordinaten zugewiesen wird.

Die innere Grenze der Iris, die die Pupille bildet, kann genau bestimmt werden durch Aus-

35 nutzen der Tatsache, daß die Grenze der Pupille im wesentlichen eine kreisförmige Kante ist. Wie in Figur 2 zu sehen ist, ist die Pupille 104 im wesentlichen dunkel, während die Iris 102 heller ist mit variierender Pigmentierung. Dieses Verhältnis kann jedoch manchmal umgekehrt sein, beispielsweise in Augen mit dunklen Irissen und einer gewissen Trübheit der inneren Linse oder aufgrund von optischer koaxialer Beleuchtung (direkt in das Auge), im Falle daß Licht von der Retina zurück und

- weder durch die Pupille nach draußen reflektiert wird. Ein weiterer Grund, daß das Bild der Pupille hell sein kann, können spekulare Reflexionen von der Bindehaut sein. Ein Verfahren für allgemeinen Zwecke für das Auffinden der Pupillengrenze sollte robust genug sein, um zuverlässig zu funktionieren, egal ob die Region der Pupille tatsächlich dunkler als die Iris ist oder nicht. In der vorliegenden
- 5 Erfindung wurde ein System des Integrierens der Hinweise auf die wahre Pupillengrenze entwickelt, das das gewünschte robuste Verhalten und die Genauigkeit aufweist.

- Das Verfahren der vorliegenden Erfindung detektiert die Pupillengrenze als eine abrupte und plötzliche Veränderung in der Helligkeit, wenn entlang eines Kreises, dessen Radius ständig erhöht
- 10 wird, summiert wird. Diese plötzliche Veränderung wird maximal sein, wenn der Kreis sein Zentrum nahe des wahren Zentrums der Pupille hat und wenn sein Radius mit dem wahren Radius der Pupille übereinstimmt. Das bildverarbeitende Problem des Findens der Pupille kann somit als ein Optimierungsproblem formuliert werden, indem eine Reihe von "explodierenden Kreisen" (ständig ver-
- größemde Radien) positioniert werden mit ihren Zentrumskoordinaten lokalisiert auf jedem einer
- 15 Anzahl von Testpunkten auf einem Gitter. Für jeden explodierenden Kreis und für jeden Wert seines Radius wird die totale Bildhelligkeit über eine feste Anzahl von Punkten, die auf diesem Kreis liegen, summiert. (Die Verwendung einer konstanten Anzahl von Punkten auf jedem Kreis, typischerweise
- 128, vermeidet ein automatisches Anwachsen der summierten Helligkeit einfach aufgrund des sich vergrößernden Umfangs.) Das System sucht nach der maximalen Veränderungsrate in der Quanti-
- 20 tät, wenn der Radius sich ausdehnt. Bei dem Kreiskandidaten, der die Pupillengrenze am besten beschreibt, wird ein plötzlicher "Spike" in der Veränderungsrate der um seinen Umfang summierten Helligkeit auftreten, wenn sein Radius gerade mit der Pupillengrenze übereinstimmt. Dieser Spike wird größer sein für einen Kreis, der mit der Pupille die Zentrumskoordinaten und den Radius ge-
- mein hat als für alle anderen Kreise. In dieser Art und Weise wurde das Problem der präzisen Loka-
- 25 lisierung der Pupille in ein Optimierungsproblem umgewandelt, indem ein drei-Parameter-Raum nach der besten Kombination der Kreiszentrumskoordinaten  $(x_0, y_0)$  und dem Radius  $r$  abgesucht wird.

- Das Verfahren der augenblicklichen Erfindung kann mathematisch beschrieben werden als
- 30 Summierung eines Umlaufintegrals der Bildintensität,  $I(x,y)$  über den Bogen ( $ds$ ) eines Kreises, dessen Radius  $r$  beträgt und dessen Zentrumskoordinaten  $(x_0, y_0)$  sind, und darauffolgendes Berechnen der partiellen Ableitung dieser Größe nach  $r$ , wenn der Radius anwächst. Der maximale Absolutwert dieser Ableitung wird gesucht über den Raum der drei Parameter  $(x_0, y_0, r)$ :

35 
$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left\| \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} I(x, y) ds \right\| \quad (1)$$

Die partielle Ableitung nach  $r$  kann eine geglättete oder verschwommene Ableitung für die Rausch-Unempfindlichkeit sein und sie kann ebenso in eine prozentuale Veränderung (geteilt durch den



gegenwärtigen Wert des Umlaufintegrals) umgewandelt werden für eine erhöhte Rausch-Unempfindlichkeit. Das Verfahren hat ebenso eine intrinsische Rausch-Unempfindlichkeit, da das Randintegral inhärent Daten über eine Kontur integriert, so daß jede abnormale Auslenkung in der Pixelhelligkeit dazu tendiert, herausgemittelt zu werden.

5

Das Suchverfahren in dem drei-Parameter-Raum wird durch den Gradientenanstieg oder sogenanntes "Hill-Climbing" gesteuert. Wenn eine Reihe von explodierenden Kreiskandidaten teilweise innerhalb der Pupille liegt, wird der Wert der in Gleichung 1 definierten Größe größer sein als für andere Kreise, die dies nicht sind. Je näher das Zentrum der konzentrischen Kreise an das wah-  
 10 re Pupillenzentrum kommt, umso größer wird diese Größe sein. In gleicher Weise wird die Größe von Gleichung 1 für Kreise von geeignetem Radius größer sein. Die Methode kann somit die optima-  
 le Kombination der drei Parameter durch einen iterativen Suchprozeß finden, in dem die Schrittgrö-  
 ße der Veränderungen in den drei Parametern mit jeder nachfolgenden Iteration kleiner wird. Be-  
 15 wegt man sich immer in die beste Richtung (in der die Rate der Verbesserung am größten ist) in dem drei-Parameter-Raum und wählt man die Schrittgrößen proportional zu der Rate der Verbesse-  
 rung und erniedrigt diese Schrittgrößen mit jeder nachfolgenden Iteration, so konvergiert die Metho-  
 de schnell. Nach üblicherweise nur vier oder fünf Iterationen sind die optimalen Werte der drei Pa-  
 rameter besser als ein Pixel genau bestimmt. Die Werte für  $(x_0, y_0, r)$  bestimmen die geschätzte Pu-  
 pillengrenze sowie den Ursprung des Polarkoordinatensystems für die nachfolgende Irisanalyse.

20

Diese effiziente Methode des Findens und Verfolgens der Pupillengrenze liefert ebenso eine wichtige Sicherungsmaßnahme gegen Betrüger. Eine offensichtliche Methode, um zu versuchen, ein Identifikationssystem, das auf Irismustern beruht, zu überlisten, wäre es, der Videokamera eine Fo-  
 tografie eines Auges einer anderen Person zu zeigen oder sogar Kontaktlinsen zu tragen, die mit dem Bild einer autorisierten Iris bedruckt sind. Ein wichtiges Merkmal eines lebenden Auges ist je-  
 25 doch, daß der Pupillendurchmesser selbst bei gleichförmiger Beleuchtung ein- oder zweimal pro Sekunde kontinuierlichen kleinen Oszillationen ("Hippus") unterliegt. Eine Fotografie einer Iris oder eine Kontaktlinse, die mit einem Irisbild bedruckt ist, würde solch eine Variation in der Zeit nicht zei-  
 gen. Da das oben beschriebene Verfahren für das Finden und Verfolgen der Pupillengrenze so  
 30 schnell ist, ist es möglich, mehrere Bilder nacheinander zu erfassen und den Pupillendurchmesser über die Zeit zu beobachten. Eine Abwesenheit von Hippus-Oszillation oder anderen kleinen Varia-  
 tionen in dem Irismuster über der Zeit würde den Beweis liefern, daß eine Fotografie oder eine Fäl-  
 schung gezeigt würde anstelle einer lebenden Iris und dies würde einen Eindringungsversuch an-  
 zeigen. Diese Fähigkeit, zwischen einer lebenden Iris und einer Fälschung oder einer Fotografie zu  
 35 unterscheiden, ist ein wichtiger Sicherheitspunkt, der durch die schnelle Einrichtung für das Definie-  
 ren und Verfolgen der Pupillengrenze möglich wurde.

Nachdem die Grenze und das Zentrum bestimmt wurden, ist der nächste Schritt, die äußere Grenze der Iris oder des Limbus zu bestimmen, an dem sie die Lederhaut (Sclera) trifft. Eine wichti-

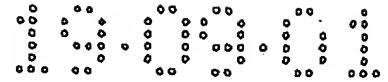
- ge Betrachtung hierfür ist die Tatsache, daß die Pupille nicht immer innerhalb der Iris zentriert ist. Der radiale Abstand zu dem rechten oder linken Limbus kann um bis zu 20% variieren und somit müssen beide Abstände berechnet werden, um ein geeignetes Iriskoordinatensystem zu erzeugen. Eine weitere Betrachtung ist die Tatsache, daß das obere und untere Augenlid im allgemeinen die obere und untere Grenze der Iris bedeckt und somit diese Regionen von der Irisanalyse ausgeschlossen werden sollten.

- Die gleiche allgemeine Methode der "explodierenden Kreise", die eine genaue Bestimmung der Pupillengrenze lieferte, kann für das Auffinden der äußeren Grenze der Iris verwendet werden, jedoch mit zwei Modifikationen. Als erstes ist das Verfahren aufgrund der gegebenen oberen und unteren Augenlidokklusion und der im allgemeinen ungleichen linken und rechten Limbusabstände auf nur zwei Bögen bzw. Kreisbögen entlang des horizontalen Meridians beschränkt, einer bei 3 Uhr und einer bei 9 Uhr, wobei jeder  $\pi/4$  Radian ( $45^\circ$ ) begrenzt. Die Abstände zu diesen zwei Grenzen an den beiden Seiten der Iris werden getrennt gemessen. Als zweites, da konzentrische Texturen innerhalb der Iris möglich sind, die ein Maximum in Gleichung 1 erzeugen können, wird das Umlaufintegral, das vorher für die Pupillengrenzen verwendet wurde, durch ein Flächenintegral ersetzt, das Irisdetails bei der Suche nach dem Limbus verschwimmen läßt. Praktisch werden die "explodierenden Kreise" durch zwei horizontal verlaufende "explodierende Tortenstücke" ersetzt, die nach einer nachhaltigen Beleuchtungsstufe suchen, die die Lederhaut an beiden Seiten anzeigt. Wie zuvor ist der Suchprozeß nur ein Verfahren des Aufsuchens des Maximums in der Veränderungsrate der integrierten Helligkeit, wenn der Radius der Ausdehnung sich erhöht. Nach der Kompensierung für die sich vergrößernde Fläche der Helligkeitsintegration korrespondiert das Maximum in dieser Ableitung nach dem Radius immer mit der korrekten linken und rechten Grenze der Iris.

- Mathematisch wird diese Operation implementiert durch das Suchen nach dem Wert für  $r$  (der Abstand von dem Pupillenzentrum entweder nach rechts oder nach links), der den Ausdruck

$$\max_{r \in [1,5r_0, 10r_0]} \frac{\partial}{\partial r} \int_{\rho=r-\delta}^{r+\delta} \frac{2}{\pi\delta r} \int_{\theta=\phi-\pi/8}^{\phi+\pi/8} I(\rho, \theta) \rho \, d\rho \, d\theta \quad (2)$$

- maximiert, wobei  $r_0$  der Pupillenradius (vorher berechnet) ist,  $\delta$  eine Kugelschale ist (typischerweise  $0,1 r_0$ ),  $I(\rho, \theta)$  die Bildintensität ist, nun in den Polarkoordinaten  $\rho$  und  $\theta$  ausgedrückt, und  $\phi$  entweder gleich 0 oder  $\pi$  ist entsprechend entweder dem 3-Uhr- bzw. dem 9-Uhr-Meridian. Es hat sich gezeigt, daß die Berechnung dieses Ausdruckes für Werte von  $r$  zwischen  $1,5 r_0$  und  $10 r_0$  (das heißt 1,5- bis 10-mal den Pupillenradius) bei der Suche nach den äußeren Grenzen der Iris erfolgreich ist, womit ein weiterer Bereich von möglichen relativen Durchmessern der Pupille und der Iris abgedeckt werden. In ähnlicher Weise hat sich die Wahl von  $\pm \pi/8$  Radian als Bogenwinkel der Integration in Gleichung (2) als eine nützliche horizontale Winkelbegrenzung für die Tortenstücke erwiesen, um



das obere und untere Augenlid zu vermeiden. Die berechneten Resultate von Gleichung (2) sind in Figur 2 gezeigt als Reihe von weißen Punkten 110-l und 110-r auf der Iris 102, die korrekt den linken und rechten Grenzen der Iris entsprechen.

- 5 Zusammenfassend findet Gleichung (1) die innere Grenze der Iris, das heißt die Pupillengrenze. Diese Gleichung erzeugt eine Reihe von "explodierenden Kreisen" bei verschiedenen Zentrumspositionen, wobei iterativ nach der einen Kombination von Parametern ( $x_0$ ,  $y_0$  Zentrum und Radius  $r$ ) gesucht wird, bei der die integrierte Helligkeit entlang des Kreises den größten absoluten Wert in der Veränderungsrate zeigt. Somit suchen wir den maximalen absoluten Wert der partiellen
- 10 Ableitung nach  $r$  des Umlaufintegrals der Helligkeit entlang des Kreises. Diese Suche deckt den  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $r$  Parameterraum ab in einem sehr effizienten iterativen Prozeß des Gradientenanstiegs. Gleichung (2) findet die äußere Grenze der Iris, nämlich den Limbus, in dem die weiße Lederhaut beginnt. Der gleiche Prozeß der explodierenden Kreise wie in Gleichung (1) würde funktionieren, außer für (i) die Okklusion des oberen Augenlides, die Schwierigkeiten verursachen könnte, und (ii) die
- 15 Tatsache, daß die Iris weniger gleichförmig als die Pupille ist und selbst große "kreisförmige Kanten" haben kann, die den Algorithmus von Gleichung (1) einfangen können. Somit spezifiziert Gleichung (2) stattdessen eine Reihe von "explodierenden Tortenstücken" in dem horizontalen Meridian (somit das obere und untere Augenlid umgehend) und integriert die Helligkeit innerhalb der Tortenstücke statt nur entlang eines Kreises. Daher bezeichnet Gleichung (2) ein Flächenintegral in Polarkoordinaten, das nach dem Radius differenziert wird anstelle eines Umlaufintegrals wie in Gleichung (1).
- 20

- Mit der Etablierung der Orte der Pupillengrenze und des Limbus und der Fixierung des Ursprungs der Polarkoordinaten in dem Zentrum der Pupille werden eine Reihe von Analysezone den Regionen der Iris zugeordnet. Diese werden konzentrisch bei festen linearen Bruchteilen des radialen Abstandes zwischen der Pupille und dem Limbus definiert, was auch immer die Gesamtgröße der Iris in einem gegebenen Bild sein soll, um Größeninvarianz in dem Code zu erzielen. Das Polarkoordinatensystem für die Iris ist somit dimensionslos sowohl in seiner Winkel- als auch seiner Radialkoordinate. Da die Iris näherungsweise als eine Gummiplatte beschrieben werden kann, die sich mit dem Pupillenreflex ausdehnt und kontrahiert, dehnen sich ihre Textur und ihre Markierungen
- 25 dementsprechend aus und ziehen sich zusammen. Diese Störungen werden eliminiert durch die Verwendung einer radialen Koordinate, die den Abstand einfach als unterschiedliche Bruchteile des Gesamtabstandes von der inneren Grenze der Iris (die Pupille) zu ihrer äußeren Grenze markiert. Somit sollte eine gegebene Iris in unterschiedlichen Zuständen der Pupillenausdehnung bei verschiedenen Gelegenheiten näherungsweise den gleichen Iriscode erzeugen. Einem zweiten Zweck
- 30 wird durch das dimensionslose Koordinatensystem gedient dadurch, daß die Differenz in der gesamten Größe des Irisbildes per se aufgrund der Bildbeschaffung aus verschiedenen Abständen den berechneten Iriscode nicht ändern wird.
- 35



Vier zusätzliche spezielle Merkmale der Analysebänder 112 werden benötigt, um die Abweichung von vielen Irisabbildungen von dem idealen kreisförmigen Stereotyp zu kompensieren. Als erstes beginnt, da die Pupille 104 selbst oftmals eine irreguläre Grenze hat, das innerste Analyseband mit einem Radius von etwa 1,1-mal dem durchschnittlichen Pupillenradius, um den völligen Ausschluß der Pupille sicherzustellen. Da der Übergang von der Iris 102 zu der Sclera 105 in gleicher Weise ebenso irregulär und nicht kreisförmig sein kann, erstreckt sich das äußerste Analyseband radial nur bis zu etwa 80% des Abstandes zu der äußeren Grenze der Iris (die nach rechts und nach links mit cosinusartiger Gewichtung in mittleren Winkeln gemessen wurde). Als drittes müssen Vorkehrungen getroffen werden für die Okklusion der oberen und unteren Abschnitte der Iris durch die Augenlider und als viertes für eine spekulare Reflexion, die ein Teil der Iris überdecken kann, wenn eine indirekte Beleuchtungsquelle (typischerweise von unten) verwendet wird. Diese unechten Merkmale werden durch Beschränkung des äußersten Analysebandes auf zwei Sektoren, die auf den horizontalen Meridian zentriert sind, wodurch die Regionen, die wahrscheinlich von dem oberen und unteren Augenlid okkludiert werden, vermieden werden und durch das Ausschließen ebenso eines engen Knotens um die 6-Uhr-Position für die spekulare Reflexion der Beleuchtung von unten ausgeschlossen. Diese ausgeschlossenen Bereiche sind in der Figur 2 als 114a und 114b bezeichnet. Es ist bevorzugt, die Irisfläche in soviel wie acht kreisförmige Bänder 112 für die Analyse aufzu-

teilen bei festen radialen Bruchteilen des Abstandes zwischen der inneren und äußeren Grenze wie oben definiert.

Nachdem die der Analyse zu unterziehende Bildfläche genau definiert wurde, verarbeitet das System dann die Daten, die von dieser Fläche erhalten werden, um den Identifikationscode zu erzeugen, wie in Block 20 von Figur 1 dargestellt ist. Anders als das System, das im Stand der Technik beschrieben ist, hängt die vorliegende Erfindung nicht von der Steuerung der Pupillenausdehnungsweite ab. Stattdessen wird, aufgrund der dimensionslosen radialen Koordinate, die einfach bestimmte Bruchteile des Abstandes von der inneren Grenze zu der äußeren Grenze der Iris abträgt, irgendein gegebenes Stück des Irisgewebes immer in dieselbe Analysezone fallen, mit den gleichen Positionskoordinaten unabhängig davon, inwieweit die Iris aufgrund der Pupillenausdehnung gestreckt oder ungestreckt ist. Dieses dimensionslose Koordinatensystem nutzt die Tatsache aus, daß das Strecken der Iris als das Strecken einer Gummiplatte approximiert werden kann, so daß ihre Markierungen immer noch mathematisch in ungestörter Form wiedergewonnen werden können, da das Koordinatensystem in einer gleichen Menge gestreckt wird. Daher wird die Textur der Iris immer in im wesentlichen dem gleichen Iriscode verschlüsselt, unabhängig des Grades der Pupillenausdehnung und unabhängig ebenso von der insgesamten Größe des Irisbildes.

Eine effektive Strategie für das Extrahieren von Texturinformationen von Bildern, wie z.B. die detaillierten Muster der Iris, ist die Faltung mit Bandpaßfiltern mit Phasenverschiebung, wie z.B. 2-D Gabor-Filtern. Diese 2-D-Filter wurden von dem Erfinder in den Jahren 1980 und 1985 jeweils als Gerüst vorgeschlagen für das Verständnis orientierungs- und frequenzselektiver, rezeptiver Feld Eigenschaften, die in Neuronen in dem visuellen Kortex von Primaten beobachtet werden, und als nützliche Operatoren für praktische Bildanalyseprobleme. Siehe Daugman, J. (1980) "Two-Dimensional Spectral Analysis of Cortical Receptive Field Profiles", Vision Research 20, S. 847-856, und Daugman, J. (1985) "Uncertainty Relation For Resolution In Space, Spatial Frequency, And Orientation Optimized By Two-Dimensional Visual Cortical Filters", Journal Of The Optical Society Of America, Band 2 (7), S. 1160-1169. Als insgesamt optimierte Filter bieten Sie eine maximale Auflösung gleichzeitig für Raumfrequenzen und Orientierungsinformation zusammen mit der 2-D-Lokalisierung; sie erreichen in einzigartiger Weise die untere Grenze für die Gesamtunsicherheit dieser vier Variablen, wie von einem unvermeidbaren Unschärfeprinzip diktiert. Diese Eigenschaften sind insbesondere für die Texturanalyse nützlich, aufgrund der 2-D spektralen Genauigkeit im Detail als auch die positionale Abhängigkeit der Textur.

Zwei Mitglieder der Familie der 2-D-Gabor-Filter sind in Figur 3 dargestellt als gradsymmetrische und ungradsymmetrische Wavelet-Profile zusammen mit ihrer Konturdarstellung. Diese lokalisierten wellenförmigen 2-D-Funktionen, die in vielen unterschiedlichen Größen und Positionen definiert sind, werden mit den Bildpixelrohdaten multipliziert und über ihr Stützgebiet integriert, um Koeffizienten zu erzeugen, die die Bildtexturinformation exakt beschreiben und verschlüsseln. Der An-

melder hat diesen den Namen "2-D-Gabor-Filter" gegeben, da sie eine 2-D-Verallgemeinerung einer Klasse von Elementarfunktionen sind, die in einer Dimension in dem Jahre 1946 durch Dennis Gabor diskutiert worden sind. Siehe Gabor, D. (1946) "Theory of Communication", J. Ins. Elec. Eng., Band 93, S. 429-457.

5. Die 2-D-Gabor-Filter, die in der vorliegenden Erfindung verwendet werden, sind in Polarko-

ordinaten wie folgt definiert:

$$G(r, \theta) = e^{-2\pi i \omega(\theta - \theta_0)} e^{-(r - r_0)^2 / \alpha^2} e^{-(\theta - \theta_0)^2 / \beta^2} \quad (3)$$

10

wobei  $r$  der Radius ist,  $\theta$  der Winkel in Radian ist,  $\omega$  die Winkelfrequenz ist und  $\alpha$  und  $\beta$  Konstanten sind.

Sowohl das reale als auch das imaginäre Gebiet des phasenverschobenen Paares (gerad-  
15 und ungeradsymmetrisch) der Filter, die von der oben angegebenen analytischen Funktion projiziert sind, werden verwendet. Die freien Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  kovariieren invers proportional zu  $\omega$ , um eine mehrskalige, selbstähnliche Familie von frequenzselektiven Filtern mit Phasenverschiebung zu erzeugen. Diese sind phasenverschoben, da beide orthogonalen Phasen in jeder Position verwendet werden. Sie sind selbstähnlich, weil die inverse Proportionalität ihrer Größen- und Frequenzpa-  
20 rameter diese alle zu zueinander ausgedehnten Abbildern macht, so daß sie eine gemeinsame Form haben. Ihre Lage, die durch  $\theta_0$  und  $r_0$  spezifiziert werden, reicht über die Analysezone der Iris.

Die Art und Weise, in der ein Iriscode durch Anwenden von 2-D-Gabor-Filtern auf die Iris  
25 erzeugt wird, ist in den Figuren 4A, 4B und 4C in Polarkoordinaten gezeigt. Die obere Zeichnung (Figur 4A) zeigt einen 1-D-Scan über die Iris bei einem bestimmten Radius und stellt die Helligkeit des Bildes als eine Funktion der Winkelkoordinate um die Iris dar (aus Gründen der Einfachheit wird das Bild hier nur als 1-D-Signal anstelle eines 2-D-Signals dargestellt). Die zweite graphische Darstellung (Figur 4B) zeigt die Antwort eines Gabor-Filters mit einer bestimmten Größe und Symmetrie, der über jede entsprechende Winkelkoordinate der Iris positioniert wurde. Es sollte erwähnt werden, daß aufgrund des Bandpaßcharakters der Gabor-Filter ihre Antwort auf das Eingangssignal entweder positiv oder negativ sein kann und um 0 gemittelt ist. Die langsame nichtinformative Verschiebung der Helligkeit des Rohsignals allmählich von oben nach unten um die Iris, die von der Beleuchtung von unten herrührt, wird durch den Bandpaß-Gabor-Filter wie das Hochfrequenzrau-  
30 schen entfernt.  
35

Jedes Bit in einem Iriscode wird dadurch bestimmt, ob die Antwort eines besonderen 2-D-Gabor-Filters mit einer bestimmten Größe, Symmetrie und Position über der Iris positiv oder negativ ist. Dieser Prozeß ist in den Gleichungen 4, 5, 6 und 7 notiert. Da dies ein "Vorzeichenbit" ist, das

verschlüsselt wird, entspricht diese Information dem meist signifikanten Bit (MSB) des Koeffizienten, der aus der Integration des Produktes eines 2-D-Gabor-Filters mit dem Eingangsbild, wie vorher beschrieben, resultiert. Die Verwendung von sowohl geraden als auch ungeraden phasenverschobenen Symmetrien von 2-D-Gabor-Filtern, die unabhängige Information integrieren, wird durch die Indizes Re und Im für die Bits, die von den entsprechenden reellen und imaginären Teilen der 2-D-Gabor-Filter in komplexer Form bestimmt wurden, bezeichnet:

$$MSB_{Re}(r, \theta) = 1, \text{ falls } \operatorname{Re} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/\alpha^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho \, d\rho \, d\phi > 0 \quad (4)$$

$$MSB_{Re}(r, \theta) = 0, \text{ falls } \operatorname{Re} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/\alpha^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho \, d\rho \, d\phi \leq 0 \quad (5)$$

$$MSB_{Im}(r, \theta) = 1, \text{ falls } \operatorname{Im} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/\alpha^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho \, d\rho \, d\phi > 0 \quad (6)$$

$$MSB_{Im}(r, \theta) = 0, \text{ falls } \operatorname{Im} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/\alpha^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho \, d\rho \, d\phi \leq 0 \quad (7)$$

Diese Bedingungen (Gleichungen 4-7) bestimmen jedes der 2048 Bits in einem Iriscode über mehrere Skalen der Analyse (gesetzt durch die Parameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\omega$ ) und über alle abgefragten Positionen (gesetzt durch die Polarkoordinatenparameter  $r$  und  $\theta$ ) innerhalb der definierten Analysezone des Irisbildes. Es ist erwähnenswert, daß eine sehr bedeutende Datenkompression in solch einem Code erreicht wird aufgrund seiner Dekorrelationsnatur. Während das Original-Irisbild typischerweise aus 262.000 Bytes (ein 512 x 512 Array von Pixeln, wobei jedes Pixel ein Byte benötigt) bestehen kann, wurde die signifikante Iristextur durch diesen multiskalierten 2-D-Gabor-Code in eine sehr kompakte Signatur reduziert, die nur 1/1000 soviel Daten (nämlich 256 Bytes) umfaßt.

Ein Beispiel eines 256 Byte langen Iriscodes ist oben in Figur 2 eingeschrieben, der als 256 Winkelspalten jede mit 8 Bits organisiert ist, die über die konzentrische Analysezone berechnet wurden. Obgleich es 2048 Bits in jedem gegebenen Code gibt, besitzt ein Code weniger als 2048 unabhängige binäre Freiheitsgrade. Der Hauptgrund ist der, daß eine substantielle radiale Korrelation in einer Iris besteht. Beispielsweise tendiert eine gegebene Furche dazu, sich über eine signifikante radiale Distanz zu erstrecken und übt somit ihren Einfluß auf mehrere voneinander entfernte Abschnitte des Codes aus. Ein zweiter Grund ist der, daß Korrelationen durch die Tiefpaßkomponente des 2-D-Gabor-Bandpaßfilters eingefügt werden. Ausdrücklich gesagt erfordert jedes Signal, das mit einem linearen Filter gefaltet wird, eine Korrelationsdistanz gleich dem Kehrwert der Bandweite des Filters.

Die tatsächliche Anzahl von unabhängigen Freiheitsgraden kann abgeschätzt werden durch Untersuchen der Verteilung von Hamming-Abständen (Anteil von nicht übereinstimmenden Bits) über eine große Population von Iriscodes, durch Vergleichen jedes Codes Bit für Bit mit jedem ande-

15

25

Der Prozeß des Vergleiches zweier Iriscodes (Figur 1, Block 26), wie z.B. eines vorher abgelegten Codes (Block 22) mit einem, der gegenwärtig von einem vorgestellten Bild errechnet wird (Block 24) ist sehr einfach aufgrund des universellen Formats und der fixen Länge all dieser Codes. Ein ähnliches Maß, Hamming-Abstand genannt, wird berechnet, das den "Abstand" mißt oder die Ähnlichkeit zwischen den beiden Codes. Diese Messung addiert einfach die Gesamtanzahl auf, wenn zwei entsprechende Bits in den zwei Iriscodes nicht übereinstimmen. Ausgedrückt als ein Bruchteil zwischen 0 und 1 würde der Hamming-Abstand zwischen irgendeinem Iriscode und einer exakten Kopie dieses Codes folglich 0 sein, da alle 2048 entsprechenden Paare von Bits übereinstimmen würden. Der Hamming-Abstand zwischen jedem Iriscode und seinem Komplement (in dem jedes Bit gerade umgekehrt ist) würde 1 sein. Der Hamming-Abstand zwischen zwei zufälligen und unabhängigen Bitreihen würde erwartungsgemäß 0,5 sein, da jedes Paar von entsprechenden Bits eine 50%-ige Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung und eine 50%-ige Wahrscheinlichkeit der Nichtübereinstimmung hat. Somit, wenn zwei Iriscodes von unterschiedlichen Augen stammen, wür-



de erwartet, daß ihr Hamming-Abstand 0,5 ist; wenn sie von demselben Auge stammen, bei verschiedenen Gelegenheiten, erwartet man, daß ihr Hamming-Abstand beachtlich niedriger ist. Wenn beide Iriscodes von einer identischen Fotografie berechnet werden, sollte ihr Hamming-Abstand 0 erreichen.

5

Vergleiche zwischen Iriscodes können mit verschiedenen unterschiedlichen relativen Verschiebungen entlang ihrer Winkelachse durchgeführt werden, um mögliche Verkippung des Kopfes des Subjekts oder Augendrehrotation zu kompensieren. Diese relativen Verschiebungen in dem Codevergleichsprozess werden leicht implementiert durch seitliches Verschieben der Iriscodes relativ zueinander, als ob der Code, der in der oberen linken Ecke von Figur 2 dargestellt ist, in einen Zylinder gerollt würde, so daß sich der linke und rechte Rand zusammenfügen und dann der Zylinder rotiert würde und der Vergleichsprozess wiederholt würde.

Die Berechnung der Hamming-Abstände zwischen Iriscodes wird durch die Verwendung des elementaren logischen Operators XOR (ausschließliches ODER) sehr einfach gemacht. Ein Paar von Bits A und B kann exakt vier mögliche Kombinationen haben:  $(AB) = (00), (01), (10) \text{ und } (11)$ . Der XOR-Operator auf zwei Eingängen ist als 1 definiert, wenn einer und nur einer der Eingänge gleich 1 ist; andererseits ist ihr XOR 0. Somit sind in dem gegebenen Beispiel für die vier möglichen Kombinationen der Bits A und B die entsprechenden Werte ihrer XOR:  $(A \text{ XOR } B) = 0, 1, 1, 0$ . Es ist klar, daß XOR somit verwendet werden kann, um eine Nichtübereinstimmung zwischen irgendeinem Paar von Bits zu detektieren, was auch immer ihr Wert ist.

Zusammenzählen der Gesamtanzahl von Fällen, in denen XOR von zwei entsprechenden Iriscodbits gleich 1 ist und Tellen durch die Gesamtanzahl solcher Vergleiche (was die Anzahl von Bits in einem Iriscode ist), ist äquivalent zu der Messung des Hamming-Abstandes zwischen zwei Codes. Alternativ dazu kann diese Quantität ebenso als die normalisierte quadrierte Länge oder quadrierte Norm des Differenzvektors zwischen den zwei Iriscodvektoren in einem 2048-dimensionalen binären Raum beschrieben werden. Alle diese Beschreibungen erzeugen die gleiche Metrik für Iriscodvergleiche und sie bieten sich für die sofortige Umwandlung in eine berechnete Wahrscheinlichkeit, daß zwei Iriscodes von der gleichen Iris und somit von der gleichen Person kommen, an.

Das Problem des Erkennens der Signatur einer gegebenen Iris als zu einem besonderen Individuum gehörend oder die Entscheidung, daß sie/er ein Betrüger ist, kann innerhalb des Gerüsts der statistischen Mustererkennung und Entscheidungstheorie formuliert werden.

35

Ja/Nein-Entscheidungen in der Mustererkennung haben vier mögliche Ergebnisse: entweder ein gegebenes Muster ist oder ist nicht ein wahres Beispiel der in Frage stehenden Kategorie und für jeden dieser zwei Fälle kann die Entscheidung korrekt oder inkorrekt sein. Diese vier Ergebnisse

werden üblicherweise bezeichnet mit Treffer, Fehler, falscher Alarm und korrekte Zurückweisung. In der vorliegenden Anmeldung sind die vier möglichen Antworten Akzeptanz eines Berechtigten (AA), Akzeptanz eines Betrügers (IA), Zurückweisung eines Berechtigten (AR) und Zurückweisung eines Betrügers (IR). Das Ziel des entscheidungsdurchführenden Algorithmus ist es, die Wahrscheinlichkeiten von AA und IR zu maximieren, während die Wahrscheinlichkeiten von IA und AR minimiert werden. Die paarweisen Kompromisse zwischen den Wahrscheinlichkeiten dieser vier Ergebnisse können in einer Weise manipuliert werden, die ihre assoziierten Kosten und ihren Nutzen in einer speziellen Anwendung reflektieren.

- 10 Eine Formulierung für die Entscheidung unter Ungewißheit ist in Figur 6 dargestellt. Eine gegebene Messung des Hamming-Abstandes oder des Bruchteils von nicht übereinstimmenden Bits zwischen zwei Iriscodes bilden einen Punkt auf der Abszisse. Die Messung wird betrachtet als eine Zufallsvariable, die einen von zwei Prozessen beschreibt, repräsentiert durch die zwei sich überlap-
- 15 pendenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Es ist a priori unbekannt, welche dieser zwei Verteilungen die Zufallsvariable beschreibt; das Ziel ist es, zu entscheiden, welche. Ein Kriterium wird gewählt, wie durch die gepunktete vertikale Linie in Figur 6 gezeigt und alle Hamming-Abstände, die kleiner als dieses Kriterium sind, werden beurteilt, daß sie zu der "Berechtigten"-Verteilung gehören, während alle Hamming-Abstände, die größer als dieses Kriterium sind, beurteilt werden, daß sie zu der "Betrüger"-Verteilung gehören. Diese zwei Verteilungen  $P_{Au}(H)$  und  $P_{Imp}(H)$  geben die Wahrscheinlichkeitsdichte eines bestimmten gemessenen Hamming-Abstandes  $H$  an, der von zwei Vergleichen der gleichen Iris (ein "Berechtigter") bzw. von zwei Vergleichen von unterschiedlichen Irissen (ein "Betrüger") herrühren.
- 20

- 25 Die vier Ausgänge AA, IA, AR und IR haben Wahrscheinlichkeiten, die nun völlig durch das gewählte Kriterium bestimmt sind und durch die statistischen Parameter der zwei unterliegenden Verteilungen. Wenn die Entscheidungsregel ist:

Akzeptiere, wenn Hamming-Abstand < Kriterium  
Weise zurück, wenn Hamming- Abstand > Kriterium

30

dann sind die Wahrscheinlichkeiten der vier möglichen Ausgänge gleich den Flächen unter den zwei Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen  $P_{Au}(H)$  und  $P_{Imp}(H)$  auf jeder Seite des ausgewählten Kriteriums,  $C$ :

35

$$P(AA) = \int_0^C P_{Au}(H) dH \quad (8)$$

$$P(AR) = \int_C^1 P_{Au}(H) dH \quad (9)$$

$$P(IA) = \int_0^C P_{\text{Im}}(H) dH \quad (10)$$

$$P(IR) = \int_C^1 P_{\text{Im}}(H) dH \quad (11)$$

5 Diese vier Wahrscheinlichkeiten werden durch die vier schattierten Flächen in Figur 6 dargestellt.

Es ist klar, daß die vier Wahrscheinlichkeiten in zwei Paare separieren, die sich zu 1 summieren müssen, und zwei Paare, die durch Ungleichungen geregelt werden:

$$10 \quad P(AA) + P(AR) = 1 \quad (12)$$

$$P(IA) + P(IR) = 1 \quad (13)$$

$$P(AA) > P(IA) \quad (14)$$

$$P(IR) < P(AR) \quad (15)$$

15 Es ist ebenso klar, daß die zwei Fehlerraten  $P(AR)$  und  $P(IA)$  minimiert werden, wenn die zwei Hamming-Abstand-Verteilungen  $P_{\text{Au}}(H)$  und  $P_{\text{Imp}}(H)$  minimale Überlappung haben. Dies kann erreicht werden entweder durch Verschieben ihrer zwei Mittel weiter voneinander weg oder durch Reduzieren ihrer Varianzen oder durch beides. Es sollte erwähnt werden, daß die zwei Verteilungen im allgemeinen nicht dieselbe Form und Varianz haben werden, was in Figur 6 aus Gründen der  
20 Einfachheit impliziert wurde.

Die Nützlichkeit oder die Identifizierungsleistung einer biometrischen Signaturmethode für das Unterscheiden zwischen und das Erkennen von Individuen kann mit Hilfe der Größe der Überlappung zwischen den zwei Verteilungen definiert werden. Es ist klar, wenn es keine Überlappung  
25 gäbe, wäre es möglich, korrekte Entscheidungen in 100% der Zeit durchzuführen. Umgekehrt, je höher die Überlappung, um so höher würde der Teil der Fehler ungeachtet des eingesetzten Entscheidungskriteriums.

Durch die Spezifizierung des Entscheidungskriteriums  $C$  in den Gleichungen (8)-(11) oben  
30 wird die Möglichkeit zur Verfügung gestellt, verschiedene Entscheidungsstrategien auszuwählen, die für unterschiedliche Applikationen am meisten geeignet sind. Beispielsweise in der Steuerung des Zugriffs auf Bankkonten in automatischen Geldautomaten kann das Erlauben, daß ARR viel größer als 0 ist, für Kundenbetreffe schlecht sein, selbst wenn dies die Tolerierung eines höheren IARs bedeutet; schließlich sind die Kosten der Akzeptierung eines Betrügers so hoch wie das ATM-  
35 Geldabhebungslimit. Auf der anderen Seite in militärischen oder Botschaftssicherheitssystemen wird ein weit konservativeres Kriterium gefordert, vielleicht so strikt wie die Wahrscheinlichkeit von eins zu einer Million, für einen Betrüger zugelassen zu werden, selbst wenn solch ein Kriterium in diesem

Fall ein höheres ARR (Prozentsatz der Berechtigten, die für eine weitere Abfragung zurückgewiesen werden) erfordern würde.

Die Manipulation des Entscheidungskriteriums C, um unterschiedliche Entscheidungsstrategien zu implementieren, ist schematisch in Figur 7 dargestellt. Eine theoretische Akzeptanzrate für Berechtigte oder  $P(AA)$  ist gegenüber einer theoretischen Akzeptanzrate für Betrüger oder  $P(IA)$  als geometrische Orte, die für verschiedene Auswahlmöglichkeiten für das Entscheidungskriterium C, wie in Figur 6 gezeigt ist, bestimmt sind, aufgetragen. Diese zwei Figuren sind nur theoretisch, um die Natur des aufgeworfenen Entscheidungsproblems zu klären, sie implizieren eine weit größere Unsicherheit als tatsächlich für dieses biometrische Erkennungssystem existiert.

Die Gleichung (14) sagt uns, daß die Strategiekurve, die in Figur 7 gezeigt ist, immer oberhalb der diagonalen Linie in diesem Wahrscheinlichkeitsraum liegt. Im allgemeinen würde man Entscheidungsstrategien verwenden wollen, die Punkte erzeugen so nahe wie möglich an der oberen linken Ecke, da das Erreichen dieses Ideals bedeuten würde, daß alle Berechtigten akzeptiert werden, während alle Betrüger zurückgewiesen werden. Es ist klar, daß Strategien, die übertrieben konservativ oder übertrieben liberal sind, dem Gleiten entlang der Kurve zu den zwei diagonalen Extremen entsprechen, indem alle Subjekte, Berechtigte und Betrüger gleich entweder allgemein zurückgewiesen (unten links) oder allgemein akzeptiert (oben rechts) werden. Es ist klar, daß die Identifizierungsleistung in Figur 7 irgendwo auf der Diagonalen somit 0 sein würde und sie würde gleich 1 sein in der oberen linken Ecke dieses Raumes. Die Ingesamte Leistung einer Erfassungsmethode ungeachtet davon, wo man das Entscheidungskriterium entlang der liberal-konservativen Strategiekurve platziert, kann somit durch die Länge des Liniensegments, das die diagonale Linie und die Krümmung in der Strategiekurve, das heißt durch die Länge des "Pfeiles" in dem "Bogen" verbindet, gemessen werden.

Nach der Formulierung des biometrischen Identifizierungsproblems innerhalb eines Gerüsts der Signalverarbeitung und statistischen Entscheidungstheorie können wir nun die Identifizierbarkeit von Personen durch ihre Irisse evaluieren.

30

Die Verteilung von Hamming-Abständen, die über 2064 Paare von verschiedenen Irisen (mit "Betrüger" bezeichnet, da kein Paar von der gleichen Person stammt) berechnet wurden, wurde vorher in Figur 5 gesehen. Wie erwartet, betrug der durchschnittliche Hamming-Abstand nahezu 0,5, da jedes Bit in den 2048 Bit (256 Byte) Codes für zwei unterschiedliche Irisen die gleiche Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung hat. Die Verteilung von Hamming-Abständen war dicht gehäuft; das tatsächliche Mittel ist  $\mu = 0,497$  mit der Standardabweichung  $\sigma = 0,038$ .

35

Figur 8 zeigt die Verteilung der Hamming-Abstände, die über 1208 Paare von unterschiedlichen Bildern der gleichen Iris ("Berechtigte") berechnet wurden, die zu verschiedenen Zeiten erhalten werden. Idealerweise sollten diese Hamming-Abstände 0 sein, wenn die Bilder tatsächlich identisch wären; jedoch erzeugen Unterschiede im Blickwinkel, teilweise Augenlidschließung, spekularer Reflexionen von der Bindehaut und relative Pupillenverengung einige Unterschiede in der verschlüsselten Struktur. Nichtsdestotrotz sind die Hamming-Abstände klar wesentlich kleiner als diejenigen, die in Figur 5 für Betrüger zu sehen sind. Die authentische Verteilung hat ein Mittel von  $\mu = 0,084$  mit einer Standardabweichung von  $\sigma = 0,0435$ .

10 Aufgrund der möglichen Variation in der Verklüppung des Kopfes einer Person bei verschiedenen Gelegenheiten zusammen mit der Zyklivergenz (Drehrotation) des Auges in seiner Buchse, ist es notwendig, alle Iriscodervergleiche über einen Bereich von verschiedenen relativen Orientierungen durchzuführen. Nur die beste erhaltene Übereinstimmung aus einem Satz von solchen Vergleichen wird als das Maß der Ähnlichkeit behalten. Da solch ein "bester von n relativen Orientierungen" Test immer den geringsten Hamming-Abstand auswählt sowohl für Vergleiche von Berechtigten als auch von Betrügern, werden beide Distributionen nach links verschoben und schmaler gemacht als sie sonst wären. Dies beeinflusst natürlich nicht die Natur der Entscheidungsaufgabe, die nicht auf irgendeiner Voraussetzung über die Formen der zwei Verteilungen basiert. Es erhöht jedoch die insgesamt Entscheidungsfähigkeit, da der Grad der Übereinstimmung zwischen unterschiedlichen Bildern des gleichen Auges sehr viel mehr von dem Vergleich von verschiedenen Kandidaten relativer Orientierung profitiert als die Übereinstimmung zwischen Codes nicht in Zusammenhang stehender Irisse.

25 Die Verteilung eines Berechtigten, die in Figur 8 zu sehen ist, wurde mit der besten aus sieben Orientierungsregeln erhalten. Figur 9 zeigt diese Verteilung in Verbindung mit der entsprechenden Verteilung für Betrüger, was den gleichen Satz von 2064 nicht miteinander in Beziehung stehender Iriscodes vergleicht, wie er für die Figur 5 verwendet wurde, jedoch nun unter Verwendung der gleichen neuen "beste aus sieben Orientierungen" Regel. Diese zwei Verteilungen haben keine empirische Überlappung. Figur 10 zeigt das gleiche Paar von Histogrammen, die durch theoretische Binominalverteilungen gefittet wurden, deren Parameter angepaßt wurden, um die Mittelwerte und Varianzen des beobachteten Paares von empirischen Verteilungen anzupassen. Die Binominalform ist mathematisch geeignet, da sie die Natur des Codevergleichsprozesses als eine statistische Abfolge von Bernoulli "Münzwürfen" Versuchen wiedergibt. Das Problem der Iriismustererkennung ist dadurch im wesentlichen in einen statistischen Test der Unabhängigkeit umgewandelt worden. Der exklusive ODER-Test zwischen den Iriscodewerten untersucht die Hypothese, daß die zwei Codesequenzen von unabhängigen zufälligen Prozessen stammen könnten. Dieser Test der statistischen Unabhängigkeit versagt ziemlich sicher für zwei Codes, die von dem gleichen Auge stammen, er wird jedoch ziemlich sicher für zwei Codes, die von unterschiedlichen Augen stammen, bestanden.

Obgleich die zwei empirischen Verteilungen, die in Figur 9 gezeigt sind, keine Überlappung haben und in der Tat keine Punkte beobachtet wurden, die in den Bereich zwischen 0,25 und 0,35 Hamming-Abstand fallen, würde es theoretisch eine Überlappung zwischen den zwei Distributionen geben, wenn eine genügend große Datenbank studiert worden wäre. Das gefittete Paar von theoretischen Binominalkurven, die in Figur 10 überlagert sind, liefert einen Weg der Abschätzung der Fehlerraten, wenn eine unbegrenzte Anzahl von Beobachtungen vorläge. Diese überlappenden gefitteten Verteilungen sollten mit der Figur 6 im Gedächtnis betrachtet werden, die das Grundgerüst für die statistische Entscheidungsfindung einführen. Wie in Gleichung (8)-(11) spezifiziert, können die Wahrscheinlichkeiten der Personenidentität oder Nicht-Identität und die prophezeiten Fehlerraten als die kumulativen Integrale unter diesen beiden Verteilungen auf beiden Seiten jedes des ausgewählten Hamming-Abstandsentscheidungskriterium berechnet werden.

Die Fehlerraten für das fälschlicherweise Akzeptieren von Betrügern (IAR) und das Zurückweisen von Berechtigten (ARR) in der beobachteten Population von 1208 Vergleichspaaren sind in Figur 11 als eine Funktion des Hamming-Abstandskriteriums aufgetragen. Dieser Graph verdeutlicht explizit den Kompromiß zwischen dem Typ 1 und Typ 2 Fehlerraten (IAR und ARR), der durch Veränderungen des Kriteriums manipuliert werden kann. Ihr theoretischer Überquerungspunkt tritt für ein Hamming-Abstandskriterium von etwa 0,321 auf, an dessen Punkt die Wahrscheinlichkeit der falschen Akzeptanz und der falschen Zurückweisung beide 1 zu 131.000 betragen. Für Situationen, die ein viel konservativeres Entscheidungskriterium erfordern, wie z.B. ein Hamming-Abstand von 0,26, für die die Wahrscheinlichkeit der Akzeptanz eines Betrügers etwa eins zu einer Milliarde betragen, zeigt Figur 11, daß die Rate der korrekten Akzeptanz von Berechtigten immer noch höher als 99,6% ist. Die gepunkteten Kurven sind die theoretischen Fehlerraten, die gemäß Gleichung (7) und (8) berechnet wurden unter Verwendung der gefitteten Binominalverteilung für  $P_{Au}(H)$  und  $P_{Imp}(H)$ , die in Figur 10 zu sehen sind.

Das Binominalgrundgerüst, das oben für diesen statistischen Mustererkennungsvorgang entwickelt wurde, erlaubt uns, den Sicherheitsgrad, der mit jeder Entscheidung, die eine Personenidentität bestätigt oder nicht bestätigt, auf Basis ihrer Signatur zu berechnen. Ausdrücklich gesagt, wenn zwei Iriscodes verglichen werden, z.B. ein vorher "registriertes" und ein gegenwärtiges, und ihr Hamming-Abstand gemessen wird, können wir die Chance berechnen, daß ein Hamming-Abstand dieser Größe oder kleiner zufällig von zwei verschiedenen Irissen hervorgerufen werden könnte. Nur wenn diese Wahrscheinlichkeit genügend klein ist, würde die Person als berechtigt akzeptiert.

Der Sicherheitsgrad, der mit der Entscheidung verbunden ist, erfordert die Summation über alle möglichen Kombinationen  $\binom{N}{m}$  in unabhängigen binären Freiheitsgraden, in denen  $m \leq CN$  Bits nicht übereinstimmen (was in einem Hamming-Abstand HD geringer oder kleiner als der Anteil

C von Nichtübereinstimmungen resultiert), multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit von jedem solchen Ereignis, vorausgesetzt, daß p die Wahrscheinlichkeit ist, daß ein Paar von Bits nicht übereinstimmen und q die Wahrscheinlichkeit ist, daß sie übereinstimmen:

$$P(HD \leq C) = \sum_{m=1}^{CN} \binom{N}{m} (p)^m (q)^{N-m} \quad (16)$$

Gleichung (16) spezifiziert die Wahrscheinlichkeit, daß der Hamming-Abstand HD zwischen Codes für unterschiedliche Irisse zufällig kleiner als ein gegebenes Entscheidungskriterium C sein könnte. Dies läßt uns für ein gegebenes Entscheidungskriterium bestimmen, wie die Wahrscheinlichkeit für eine falsche Akzeptanz ist (die Stirling'sche Näherung erlaubt Abschätzungen der großen Faktoren, die benötigt werden, um Gleichung (16) zu berechnen). Wie in Figur 12 tabelliert ist, betragen diese theoretischen Möglichkeiten grob eins zu 2,4 Millionen für ein Hamming-Abstandskriterium von 0,3 und die Möglichkeiten erreichen schnell "planetarisches" Niveau (in den Milliarden) für Kriterien von 0,26 oder kleiner. Es ist offensichtlich, daß solch unwahrscheinliche Fehler, wenn solche Kriterien verwendet werden, niemals in der existierenden Datenbank auftreten. In der Tat war die Akzeptanzrate für Betrüger, die zwischen den 2064 Iriscodevergleichen beobachtet wurde, bereits bei 0 für ein Hamming-Abstandskriterium von 0,35 an dessen Punkt die theoretische Zurückweisungsrate für Berechtigte etwa eins zu einer Million beträgt (untere Zeile von Figur 12).

Ein Schlußmaß der Leistung des vorliegenden biometrischen Signatursicherungssystems ist der berechnete Sicherheitsgrad, der mit typischen oder durchschnittlichen Hamming-Abständen verbunden ist, auf den man bei verschiedenen Bildern der gleichen Iris trifft. Wie aus den Histogrammen von Figur 8 und 9 deutlich wurde, war der mittlere Hamming-Abstand zwischen zwei Iris-codes, die von der gleichen Iris erzeugt wurden, 0,084. Für diesen typischen Fall wird der Sicherheitsgrad für eine Entscheidung, ein Individuum als berechtigt zu akzeptieren, wahrhaft astronomisch. Ausdrücklich gesagt, betragen die Möglichkeiten, daß ein Hamming-Abstand dieser durchschnittlichen Größe oder kleiner von einem Betrüger stammen könnte, entsprechend Gleichung (16) eins zu  $10^{31}$ .

Die Analyse, die durch diese Ausführungsform der vorliegenden Erfindung durchgeführt wurde, erzeugt einen Identifikationscode von 256 Bytes von Daten (2048 Bits). Es wurde gefunden, daß diese Anzahl einen zuverlässigen Identifikationscode liefert, kombiniert mit optimierten Verarbeitungsmerkmalen. Der Iriscode bildet alle unterschiedlichen Irisse in einen universellen abstrakten mathematischen Code von fester Länge ab. Dies erlaubt Codevergleiche extrem effizient durchzuführen, selbst zwischen relativ "merkmalsarmen" Irisen (vielleicht als Ergebnis einer Abbildung von niedrigem Kontrast) und denjenigen, die mit einer vielseitigen sichtbaren Textur abgebildet wurden.

Der Vergleichsprozeß eignet sich direkt für die einfache Hardwareimplementierung basierend auf dem XOR-Gatter. Gebildet von nur drei Transistoren, sind XOR-Gatter in Standardhalbleiterchips erhältlich. Beispielsweise enthält der Standard-IC mit dem Namen 74F86 vier unabhängige XOR-Gatter, die mit 80 MHz betrieben werden können, und ist bei vernachlässigbaren Kosten erhältlich. Jeder Vergleich zwischen zwei Iriscodes sowie umfassende Suche durch große Datenbanken von abgelegten Iriscodes können extrem schnell und mit inhärentem Parallelismus implementiert werden. Beispielsweise könnte eine Platine, die eine 32 x 32-Anordnung von 74F86 IC enthält, umfassend einen "dargebotenen" Iriscode mit einer Population von 160 Millionen vorher abgelegten Iriscodes innerhalb einer Sekunde vergleichen, um zuverlässig zu etablieren, ob das Individuum eine dieser Personen ist.

Da jedes Bit in dem Code als eine binäre Zufallsvariable betrachtet werden kann, wurde die Theorie der Binominalstatistik angewandt, um die Wahrscheinlichkeit jedes gegebenen Bruchteils der Bits in zwei unterschiedlichen Iriscodes, die per Zufall übereinstimmen, zu bestimmen. Dies erlaubt die objektive Berechnung des Sicherheitsgrades für jede Entscheidung unter Verwendung von statistischer Entscheidungstheorie. Insoweit das Mustererkennungsproblem hier in eine statistische Unabhängigkeitsüberprüfung auf der Polarität von Gabor-Koeffizienten, die über mehrere Skalen der Analyse in einem dimensionslosen Koordinatensystem berechnet wurden, umgewandelt wurde, kann die insgesamt theoretische Basis der vorliegenden Erfindung als eine Synthese von einzigartigen Signalverarbeitungsverfahren mit statistischer Entscheidungstheorie betrachtet werden.

Es versteht sich, daß die oben beschriebene Ausführungsform nur illustrativ für die Anmeldung ist. Andere Ausführungsformen können leicht von den Fachleuten entworfen werden, die die Prinzipien der Erfindung verkörpern und in den Schutzbereich hiervon fallen.



92921735.4 - 0664037  
Iridian Technologies, Inc.

5

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum eindeutigen Identifizieren einer bestimmten menschlichen Person durch biometrische Analyse der Iris des Auges, mit den folgenden Schritten:  
Beschaffen (10) eines Bildes eines Auges der zu identifizierenden menschlichen Person,  
10 Isolieren und Definieren (12, 14, 16, 18) der Iris des Auges innerhalb des Bildes,  
Definieren (18) einer Mehrzahl ringförmiger Analysebänder innerhalb der Iris, wobei die radiale Breite eines ringförmigen Bandes als fester Bruchteil der radialen Weite der Iris festgelegt wird,  
Analysieren (20) der Iris, um einen aktuell vorliegenden Iriscode zu erzeugen,  
Vergleichen (26) des vorliegenden Codes mit einem früher erzeugten Referenzcode der Iris,  
15 um ein Maß der Ähnlichkeit zwischen dem vorliegenden Iriscode und dem Referenzcode zu erzeugen, und  
Umwandeln (28) des Maßes der Ähnlichkeit in eine Entscheidung, daß die Iriscodes entweder von derselben Iris stammen oder nicht.
- 20 2. Verfahren nach Anspruch 1, welches weiterhin den Schritt aufweist:  
Berechnen (30) eines Vertrauensniveaus (Konfidenz) für die Entscheidung.
3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei der Schritt des Isolierens und Definierens weiterhin die Schritte aufweist:  
25 Definieren einer kreisförmigen Pupillengrenze zwischen den Iris- und den Pupillenabschnitten des Bildes,  
Definieren (14) einer weiteren kreisförmigen Grenze zwischen den Iris- und den Lederhautabschnitten des Bildes unter Verwendung von Bögen bzw. Kreisbögen, die nicht notwendigerweise konzentrisch zu der Pupillengrenze liegen, und  
30 Bereitstellen (16) eines Systems von Polarkoordinaten für das isolierte Irisbild, wobei der Ursprung des Koordinatensystems das Zentrum der kreisförmigen Pupillengrenze ist, wobei die radiale Koordinate gemessen wird als Prozentwert des Abstandes zwischen der kreisförmigen Pupillengrenze und der kreisförmigen Grenze zwischen der Iris und der Lederhaut.
- 35 4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Analysebänder bestimmte vorgewählte Abschnitte des Irisbildes ausschließen, die wahrscheinlich durch die Augenlider, die Wimpern oder spiegelnde Reflexion von einer Beleuchtung verdeckt bzw. unsichtbar gemacht werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei der Analyseschritt die Schritte aufweist:

Analysieren des Teiles des Irisbildes, welches innerhalb der ringförmigen Analyseebänder liegt und Verwenden von Signalverarbeitungseinrichtungen, um einen Iriscode für diesen Irisbildbereich zu erzeugen.

- 5    6.    Verfahren nach Anspruch 5, wobei  
       die Signalverarbeitungseinrichtung das Anwenden von mehrskaligen, selbst-ähnlichen, zweidimensionalen Bandpaßfiltern mit Phasenverschiebung in Polarkoordinaten für das Irisbild aufweist.
- 10   7.    Verfahren nach Anspruch 6, wobei der Iriscode eine feste Anzahl von Bits und ein universelles Format für alle Irisbilder hat.
8.    Verfahren nach Anspruch 7, wobei der Analyseschritt aufweist:  
       Anwenden der Bandpaßfilter auf einen Bereich des rohen Irisbildsignals, um einen Luminanzfehler zu beseitigen, um geringförmige Luminanzgradienten zu beseitigen, die von einer schrägen Beleuchtung herrühren, um Rauschen zu entfernen und um einen Treppeneffekt (Sägezahnverzerrung) zu vermeiden.
- 15        9.    Verfahren nach Anspruch 8, wobei:  
       20    der Wert jedes Bits in dem Iriscode als "1" oder "0" bestimmt wird, indem über irgendeinen Bereich der Iris, welcher die Grundlage für die Filter auf einer gegebenen Größe und an einer gegebenen Stelle bildet, das höchstwertige Bit (MSB) der Filterausgänge gemäß den folgenden Definitionen berechnet wird:
- $$MSB_{Re}(r, \theta) = 1, \text{ falls } \operatorname{Re} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/a^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho \, d\rho \, d\phi > 0$$

$$MSB_{Re}(r, \theta) = 0, \text{ falls } \operatorname{Re} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/a^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho \, d\rho \, d\phi \leq 0$$

$$MSB_{Im}(r, \theta) = 1, \text{ falls } \operatorname{Im} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/a^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho \, d\rho \, d\phi > 0$$

$$MSB_{Im}(r, \theta) = 0, \text{ falls } \operatorname{Im} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/a^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho \, d\rho \, d\phi \leq 0$$
- 25        10.    Verfahren nach Anspruch 9, wobei der Vergleichsschritt die Schritte aufweist:  
       Vergleichen irgendwelcher zwei Iriscodes durch Berechnen des elementaren logischen XOR (logische Ausschließlich-ODER-Operation) zwischen all ihren entsprechenden Bits, und  
       Berechnen der quadratischen Norm des resultierenden binären Vektors,  
       30    wobei dieses Vergleichsmaß als der Hamming-Abstand zwischen den beiden Iriscodevektoren definiert wird.
11.    Verfahren nach Anspruch 10, welches weiterhin aufweist:

Wiederholen des Schrittes für mehrere verschiedene relative Verschiebungen des Iriscodes entlang ihrer Winkelachse, um eine mögliche Verkipfung bzw. Verdrehung des Kopfes des dargebotenen Objektes oder eine Zyklivergenz (das heißt eine Augenverdrehung mit Torsion) auszugleichen.

5

12. Verfahren nach Anspruch 11, wobei der Berechnungsschritt die Schritte aufweist:

Umwandeln des Hamming-Abstandes in eine berechnete Wahrscheinlichkeit, daß die beiden Codes aus derselben Iris und damit von derselben Person stammen.

10

13. Verfahren nach Anspruch 12, wobei

die berechnete Wahrscheinlichkeit erhalten wird durch Berechnen der Wahrscheinlichkeit, daß ein beobachteter, passender Bruchteil von Bits in dem vorliegenden Code und dem Bezugscode zufällig miteinander übereinstimmen könnten, falls die Codes unabhängig voneinander wären, das heißt von verschiedenen Irissen herrühren würden.

15

14. Verfahren nach Anspruch 13, wobei:

der gemessene Hamming-Abstand in eine Wahrscheinlichkeit umgewandelt wird, daß die beiden Iriscodes von demselben Auge stammen,

ein vorgewähltes Kriterium auf den gemessenen Hamming-Abstand angewendet wird, um

20

eine "ja"- oder "nein"-Entscheidung zu erzeugen, und

durch die berechnete Wahrscheinlichkeit ein Konfidenzniveau für die Entscheidung geliefert wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14, wobei:

25

die kreisförmige Pupillengrenze definiert wird durch die Beziehung:

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left\| \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} I(x, y) ds \right\|$$

wobei  $r$  der Radius der Grenze,  $x_0$  und  $y_0$  Koordinaten des Zentrums und  $I$  die Intensität des Bildes sind,

wobei die Koordinate des Radius und des Zentrums nach einem vorgewählten Muster variiert werden.

30

16. Verfahren nach Anspruch 15, wobei:

die andere kreisförmige Grenze zwischen dem Iris- und dem Hornhautabschnitt des Bildes definiert wird durch Bestimmen der Abstände von dem Ursprung des Koordinatensystems zu dem linken und rechten Bindehautring gemäß der folgenden Beziehung:

35

$$\max_{r \in [1,5r_0, 10r_0]} \left\| \frac{\partial}{\partial r} \int_{\rho=r-\delta}^{r+\delta} \frac{2}{\pi \delta r} \int_{\theta=\phi-\pi/8}^{\phi+\pi/8} I(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right\|$$

wobei  $r$  der zuvor definierte Pupillenradius ist,  $\delta$  der Abstand bzw. das Maß einer Radialschale ist,  $I(\rho, \theta)$  die ursprüngliche Bildintensität in Polarkoordinaten ist und  $\theta$  gleich 0 oder  $\pi$  ist, um die Bindehautgrenze in den Meridianbereichen der 3 Uhr- bzw. 9 Uhr-Position zu finden.

- 5 17. Verfahren nach Anspruch 16, wobei:

die Analysebänder eine Mehrzahl ringförmiger Bänder umfassen, die sich vollständig um die Pupille herum erstrecken, sowie eine Mehrzahl von halbkreisförmigen Bändern, die sich von Polarkwinkeln von  $45^\circ$  bis  $135^\circ$  und von  $225^\circ$  bis  $315^\circ$  um die Pupille herum erstrecken.

- 10 18. Verfahren nach Anspruch 17, wobei:

die Analysebänder in gleichen Bruchteilen des radialen Abstandes von einem inneren Punkt aus, der unter einem vorgewählten Bruchteilabstand von der Pupillengrenze angeordnet ist, bis zu einem äußeren Punkt, der unter einem vorgewählten Bruchteilabstand von dem Bindehautring angeordnet ist, voneinander beabstandet sind, wobei der Abstand in Winkelrichtung gewichtet wird, um den Unterschied zwischen den Bruchteilabständen von dem Koordinatenzentrum zu den rechten und linken Bindehautringen zu berücksichtigen.

19. Verfahren nach Anspruch 14, wobei die Bandpaßfilter 2-D-Gaborfilter sind.

- 20 20. Verfahren nach Anspruch 19, wobei die 2-D-Gaborfilter folgendermaßen in Polarkoordinaten definiert sind:

$$G(r, \theta) = e^{-2\pi i \omega(\theta - \theta_0)} e^{-(r - r_0)^2 / \alpha^2} e^{-(\theta - \theta_0)^2 / \beta^2}$$

wobei  $r$  der Radius,  $\theta$  der Winkelabstand in Radian,  $\omega$  die Frequenz und  $\alpha$  und  $\beta$  Konstanten sind.

25

21. Verfahren nach Anspruch 20, wobei der Iriscode aus 2048 Bits besteht.

22. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die kreisförmige Pupillengrenze durch die Beziehung definiert wird:

30 
$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left\| \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} I(x, y) ds \right\|$$

wobei  $r$  der Radius der Grenze,  $x_0$  und  $y_0$  die Koordinaten des Zentrums und  $I$  die Bildintensität ist,

wobei der Radius und die Zentrumskoordinaten systematisch durch einen iterativen Gradientenanstieg variiert werden, um das Maximum in der definierten Beziehung zu finden.

35

23. Verfahren nach Anspruch 22, wobei:

die andere kreisförmige Grenze zwischen der Iris und dem Lederhautabschnitt des Bildes definiert wird durch Bestimmen der Abstände vom Ursprung des Koordinatensystems zu der linken und rechten Bindehautgrenze gemäß der folgenden Beziehung:

$$\max_{r \in [1,5r_0, 10r_0]} \frac{\partial}{\partial r} \int_{\rho=r-\delta}^{r+\delta} \frac{2}{\pi\delta r} \int_{\theta=\phi-\pi/8}^{\phi+\pi/8} I(\rho, \theta) \rho \, d\rho \, d\theta$$

- 5 wobei  $r_0$  der zuvor definierte Pupillenradius ist,  $\delta$  ein Radialschalenabstand ist,  $I(\rho, \theta)$  die ursprüngliche Bildintensität in Polarkoordinaten ist, und  $\phi$  gleich 0 oder  $\pi$  ist, um die Bindehautgrenze an dem der Position 3 Uhr bzw. 9. Uhr entsprechenden Meridian zu finden.

24. Vorrichtung für das eindeutige Identifizieren einer bestimmten menschlichen Person durch  
10 biometrische Analyse der Iris des Auges, mit:

einer Abbildungsausrüstung für das Erfassen eines digitalen Bildes eines Auges der Person, die es zu identifizieren gilt, und

- einem Prozessor, wobei der Prozessor so programmiert ist, daß er die Iris des Auges innerhalb des Bildes isoliert und festlegt, eine Mehrzahl von ringförmigen Analysebändern innerhalb der  
15 Iris definiert, wobei die radiale Weite eines ringförmigen Bandes als fester Bruchteil der radialen Weite der Iris definiert ist, weiterhin die Iris analysiert, um einen Code der vorliegenden Iris zu erzeugen, den vorliegenden Code mit einem früher erzeugten Bezugscode der Iris vergleicht, um ein Maß der Ähnlichkeit zwischen dem vorliegenden Iriscode und dem Bezugscode zu erzeugen und um das Ähnlichkeitsmaß in eine Entscheidung umzuwandeln, daß die Iriscodes entweder von der-  
20 selben Iris herrühren oder nicht.

19.09.01

1/12

92921735.4 - 0664037  
Iridian Technologies, Inc.

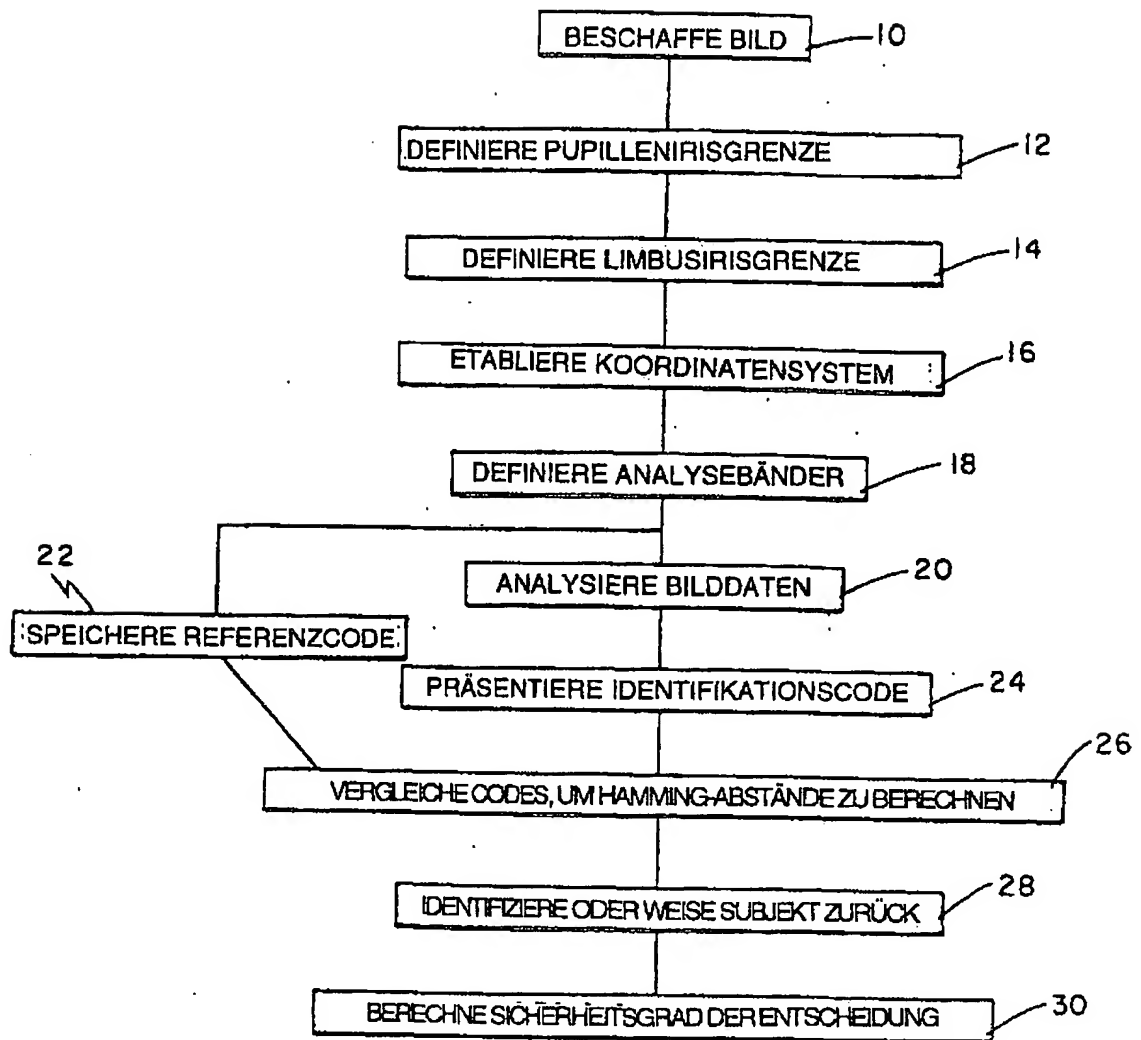


FIG. 1

19.09.01

2 / 12

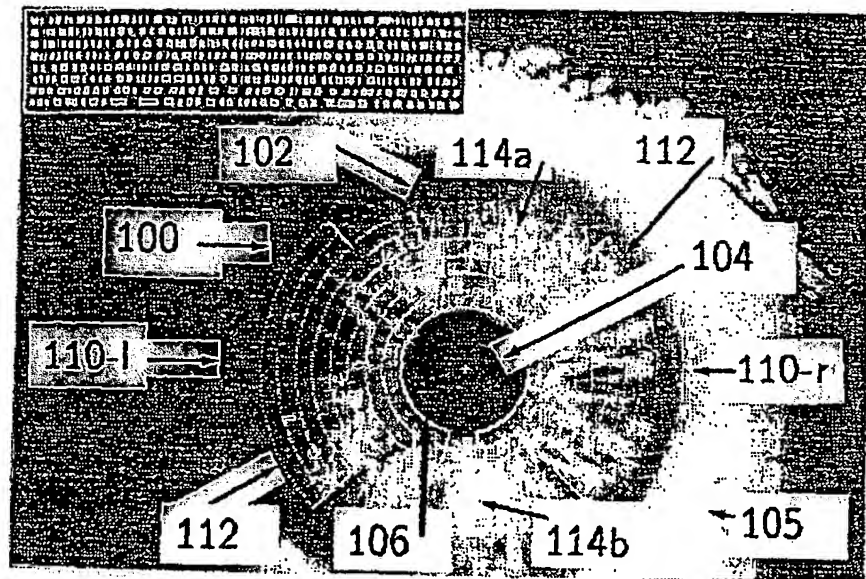


FIG. 2

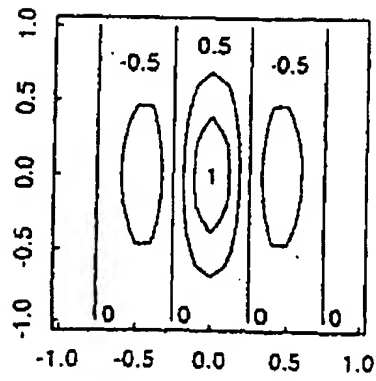
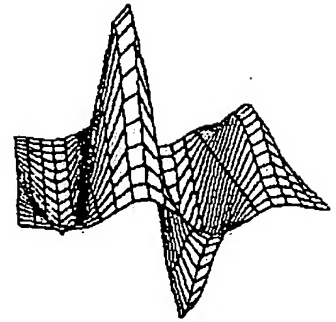
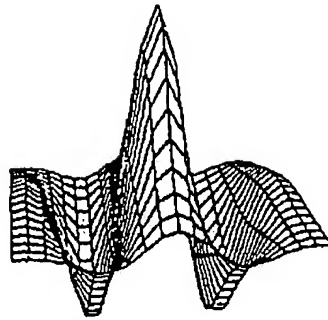


FIG. 3A

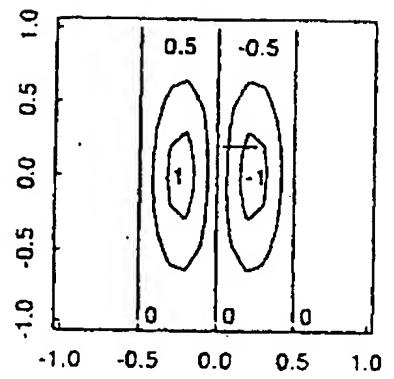
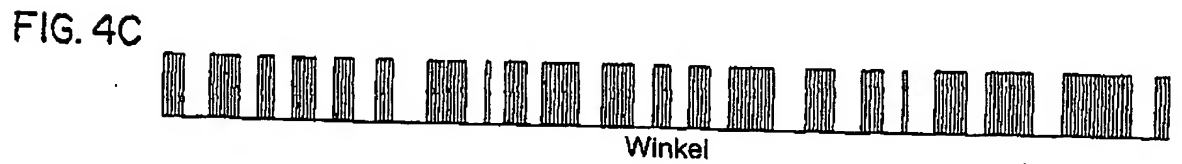
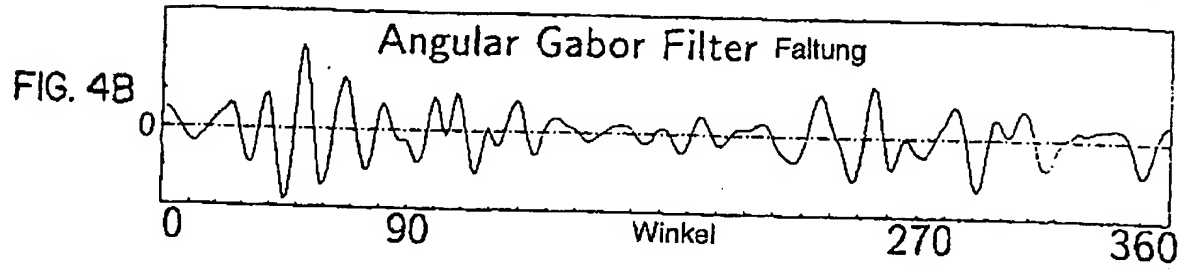
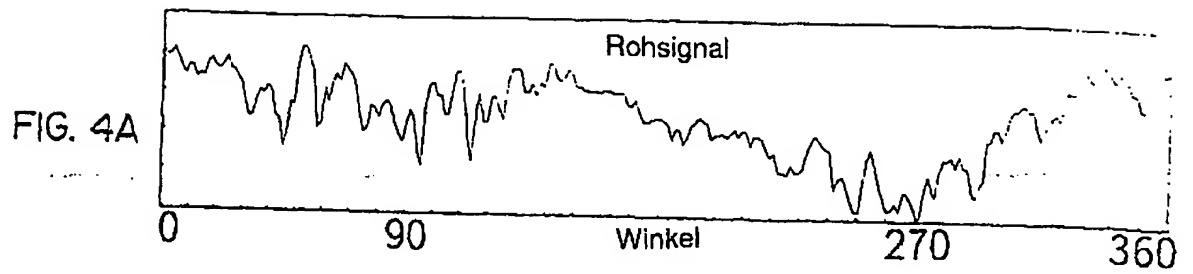


FIG. 3B





5/12 19.09.01

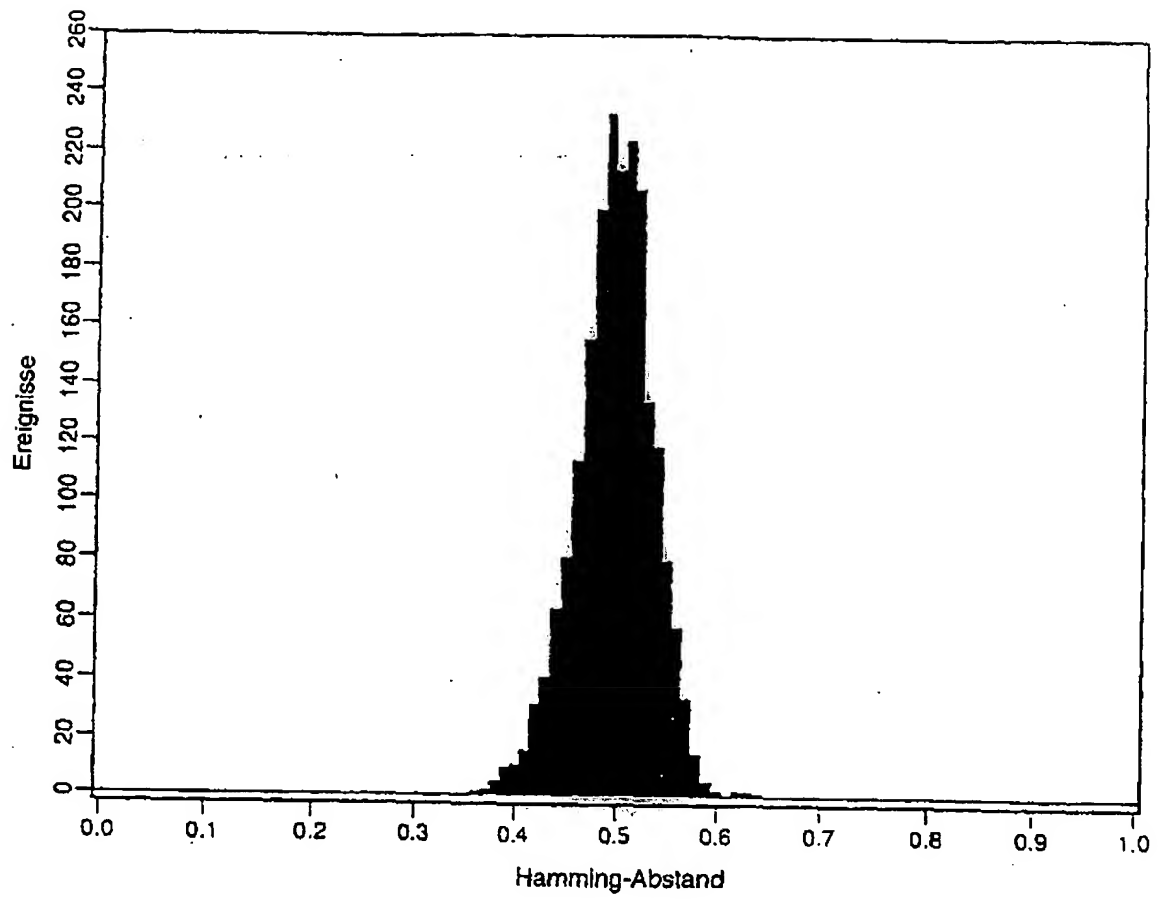


FIG. 5

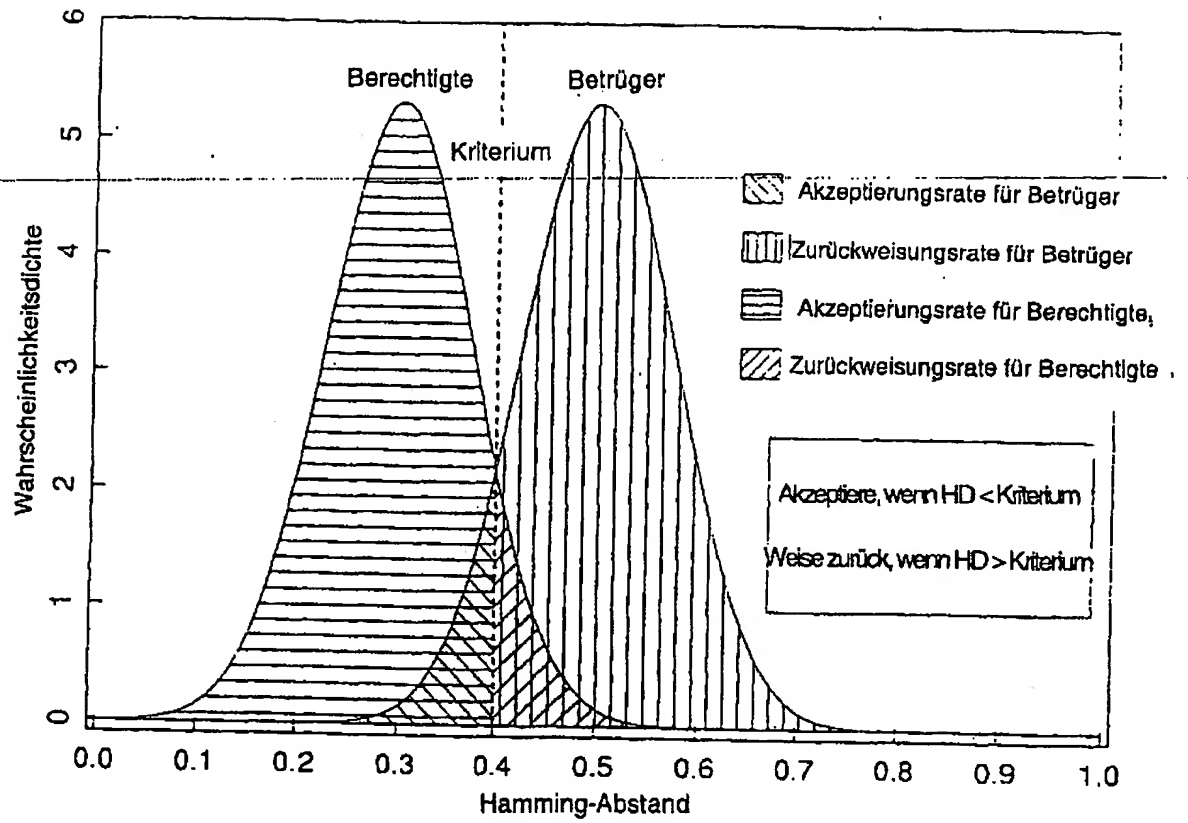


FIG. 6

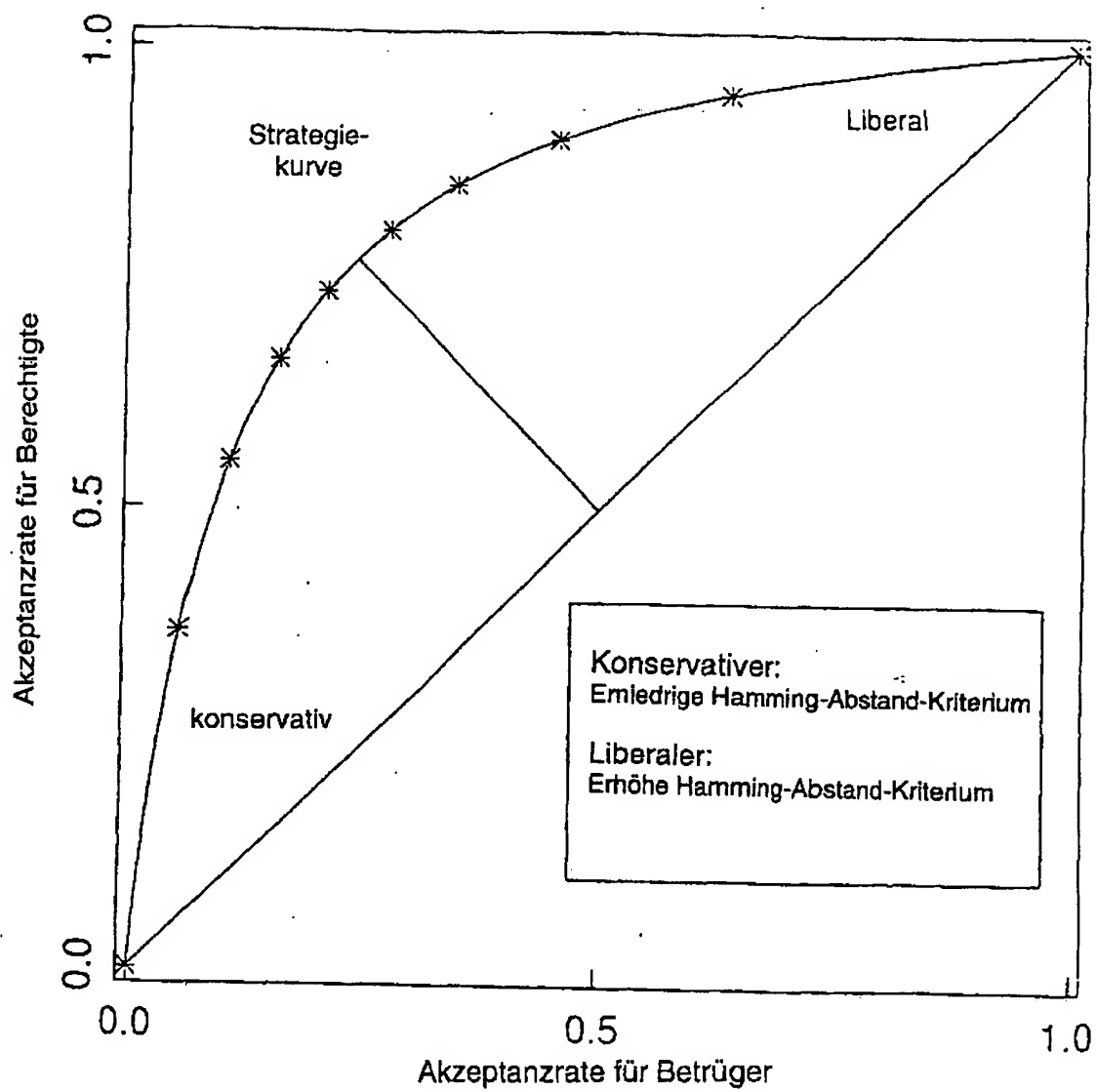


FIG. 7

19.09.01

8 / 12

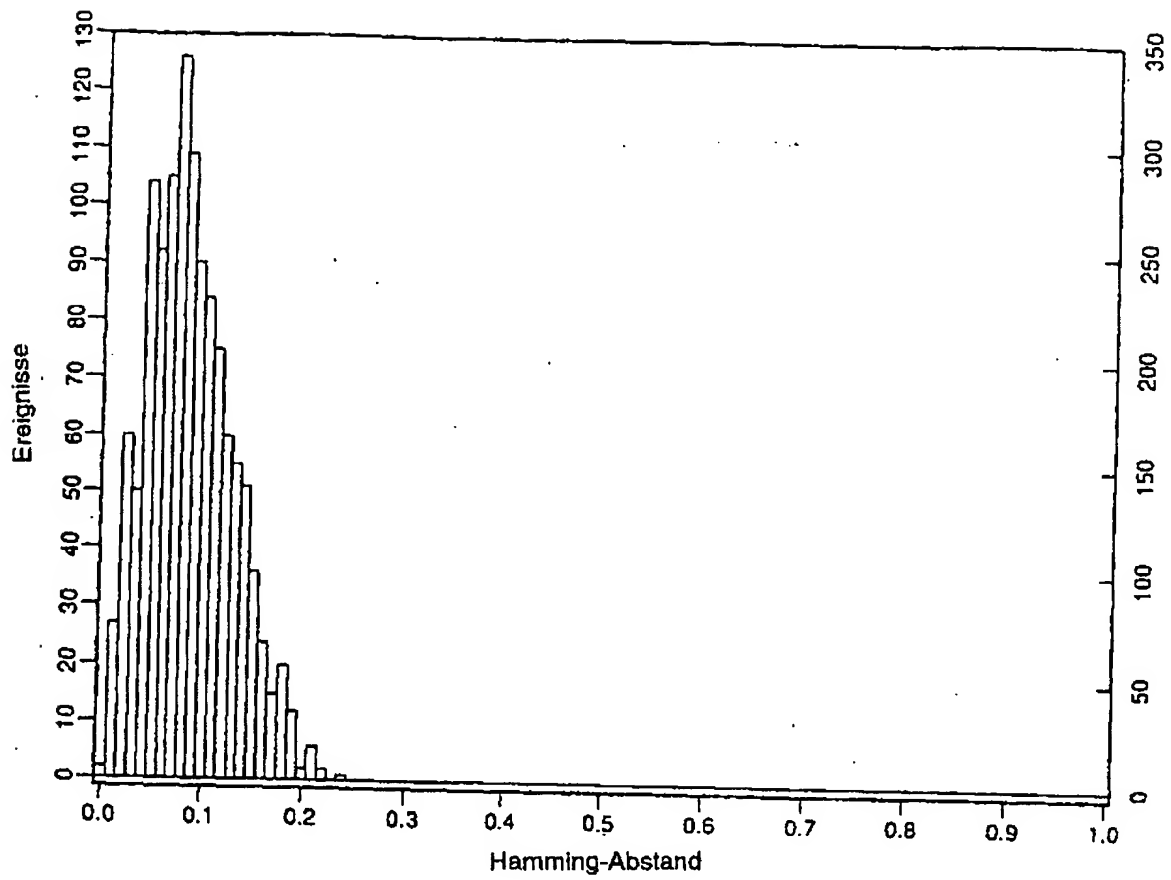


FIG. 8

9/ 12

19.09.01

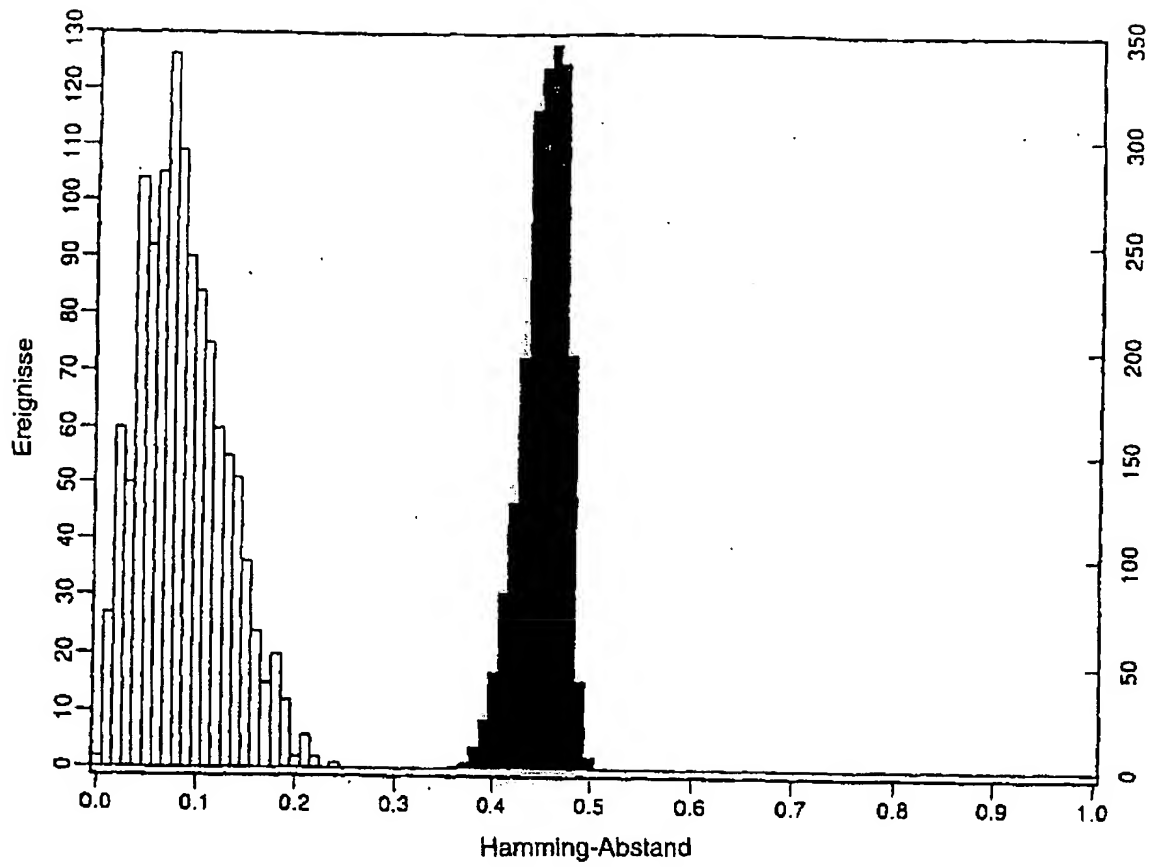


FIG. 9

19.09.01

10/12

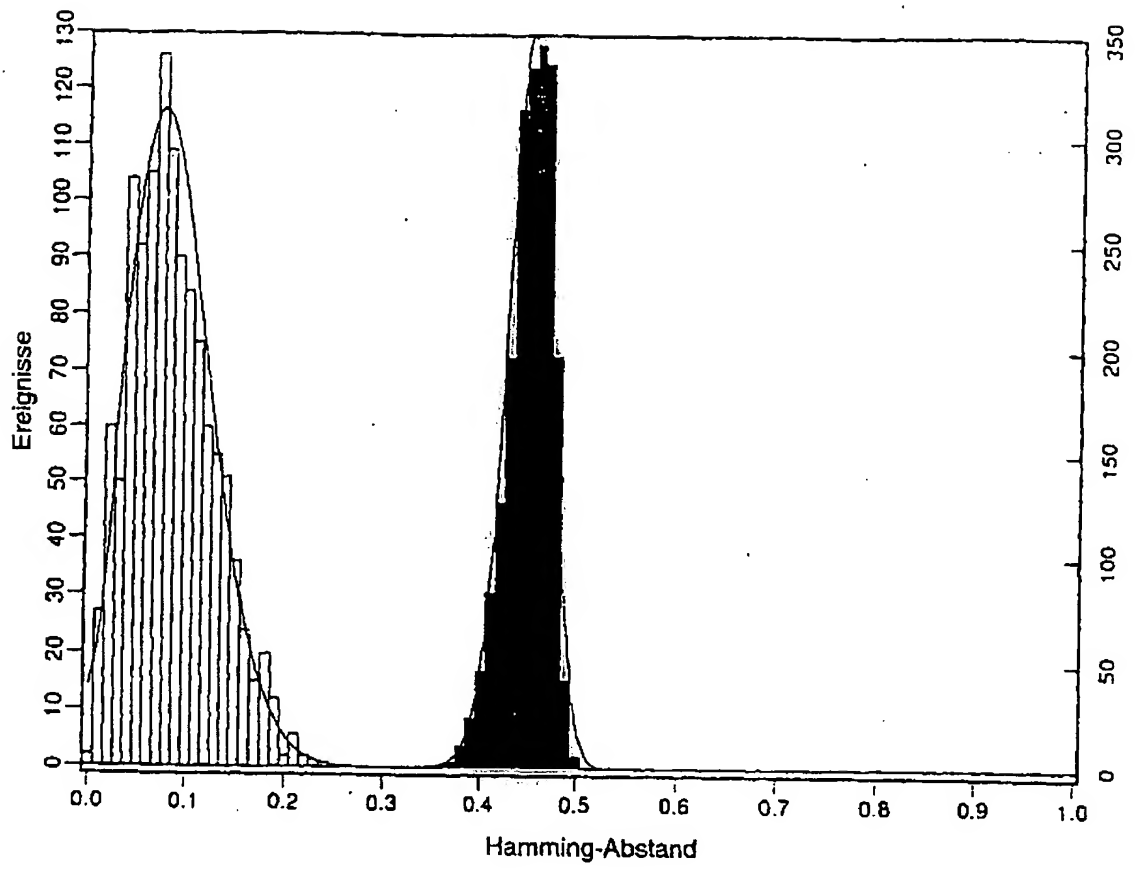


FIG. 10

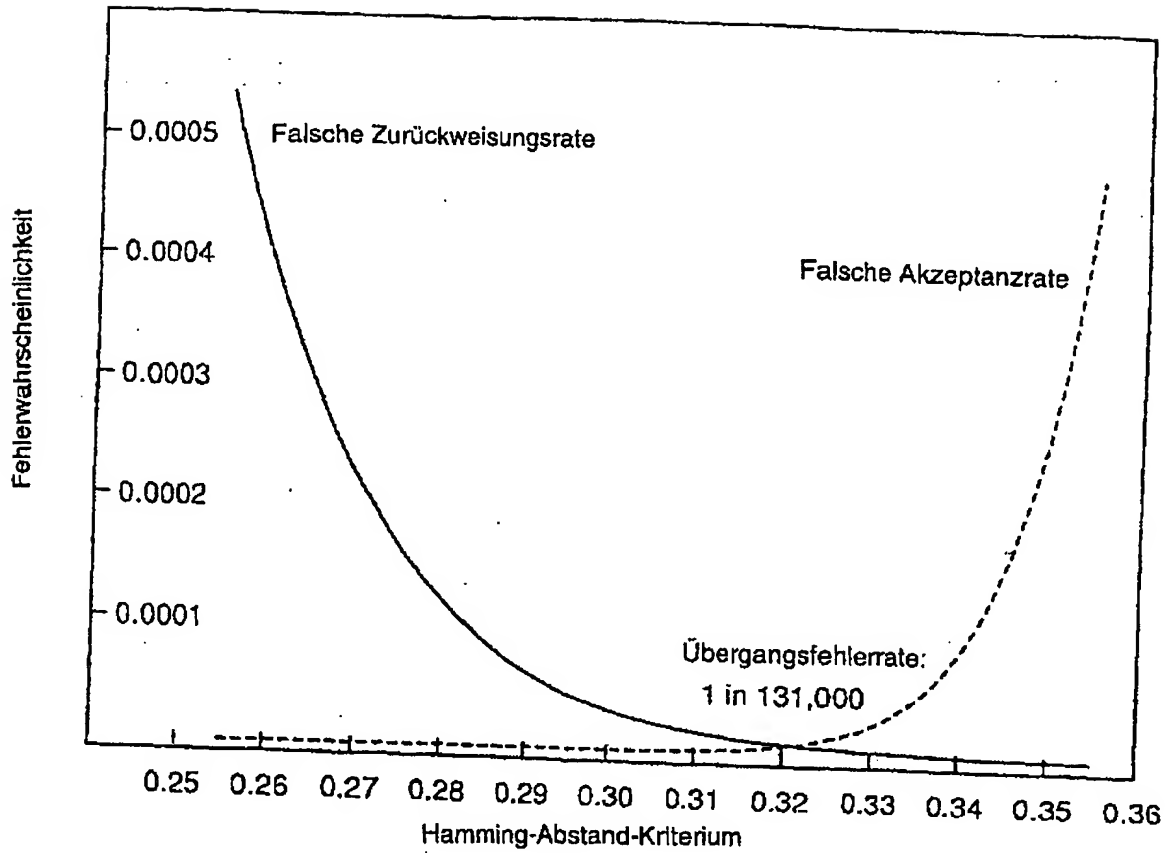


FIG. II



<u>HD-Kriterium</u>	<u>Möglichkeiten der falschen Akzeptanz</u>	<u>Möglichkeiten der falschen Zurückweisung</u>
0.25	1 in 13.5 Milliarden	1 in 1,490
0.26	1 in 2.04 Milliarden	1 in 2,660
0.27	1 in 339 Millionen	1 in 4,850
0.28	1 in 60 Millionen	1 in 9,000
0.29	1 in 12 Millionen	1 in 17,100
0.30	1 in 2.4 Millionen	1 in 32,800
0.31	1 in 603,000	1 in 64,200
<b>0.32</b>	<b>1 in 151,000</b>	<b>1 in 128,000</b>
0.33	1 in 39,800	1 in 260,000
0.34	1 in 11,500	1 in 536,000
0.35	1 in 3,630	1 in 1.12 Millionen

FIG. 12